

平成26年度

放射性廃棄物共通技術調査等事業

放射性廃棄物重要基礎技術研究調査

(国庫債務負担行為に係るもの)

報告書

(平成26年度分)

平成27年3月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託事業として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成26年度「放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物重要基礎技術研究調査）（国庫債務負担行為に係るもの）」※の、平成26年度の成果を取りまとめたものです。

（※本事業は平成29年度までの4カ年の事業である）

【目次】

1. はじめに.....	1
1.1 調査目的と調査内容	1
1.1.1 調査目的	1
1.1.2 調査内容	1
1.2 調査の計画立案と実施方針	1
1.2.1 処分技術に関連する先進的な研究開発テーマの選定に関する作業計画	4
1.2.2 選定した研究開発に関する進捗管理・取りまとめに関する作業計画.....	4
2. 処分技術に関連する先進的な研究開発テーマの選定.....	6
2.1 処分技術に関連する研究開発テーマの選定	6
2.2 研究テーマと研究実施者の公募・選考.....	9
2.3 選考委員会による応募研究テーマと研究実施者の選定.....	10
3. 研究開発に関する進捗管理・取りまとめ.....	12
3.1 選定された研究テーマの平成 26 年度の成果概要	13
3.1.1 実施研究 1 研究者：京都大学 柏谷公希.....	13
3.1.2 実施研究 2 研究者：鳥取大学 奈良禎太.....	15
3.1.3 実施研究 3 研究者：福島工業高等専門学校 金澤伸一	17
3.1.4 実施研究 4 研究者：京都大学 小林大志.....	19
3.1.5 実施研究 5 研究者：東北大学 千田太詩.....	21
3.1.6 実施研究 6 研究者：東京大学 小松崎俊作.....	23
3.2 検討委員会による平成 26 年度の研究成果に対する評価	25
3.3 地層処分基盤研究開発に関する進捗状況の中間評価とチェックアンドレビュー	32

別添資料 実施研究報告

- 研究報告 1 断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究
- 研究報告 2 岩石き裂の治癒作用を利用した不連続面のバリア性能向上に関する研究
- 研究報告 3 天然バリアと人工バリアの力学特性を考慮した放射性廃棄物処分施設の長期的な力学挙動予測システムの開発
- 研究報告 4 硝酸塩影響評価のための高イオン強度下におけるアクチノイドの溶液化学

的研究

研究報告 5 地層処分の性能評価の精緻化を目指した薄片状雲母を用いた核種の収着メ
カニズムに関する基礎的研究

研究報告 6 高レベル放射性廃棄物処分に関わるアジェンダ・セッティング（政策課題設
定）の基礎的研究

1. はじめに

1.1 調査目的と調査内容

1.1.1 調査目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物の地層処分や長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）をはじめとする低レベル放射性廃棄物の処理処分等に係る政策立案や研究開発については、国や関係機関、処分実施主体（原子力発電環境整備機構：NUMO）等の適切な役割分担のもとで進めていくことが重要である。

これらの背景を踏まえて、本事業では、平成 26 年度より 4 年間の事業期間で高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした先進的な研究開発を実施するとともに、今後の我が国の基盤研究開発の課題を検討することで、処分実施主体が将来処分事業を進めるにあたって必要となる技術基盤の整備を図ることを目的として実施する。

1.1.2 調査内容

上記の調査の目的を踏まえ本事業では、処分技術に関連する先進的な研究開発テーマ及び研究実施者を公募したうえで選定し、当該テーマに関する研究開発を実施するとともに、研究の実施に係る進捗管理や成果のとりまとめを行う。さらに、選定した研究開発テーマに関連して、「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 25 年度～平成 29 年度）」（以下、全体計画という）に示される研究開発状況の中間評価、及びその後の研究開発状況のチェックアンドレビューも合わせて行う。

1.2 調査の計画立案と実施方針

前述した調査内容に基づき、平成 26 年度～平成 29 年度の具体的な作業内容について表 1.2-1 に示す。

表 1.2-1 本事業における平成 26 年度～29 年度の作業内容

<p>(1) 処分技術に関連する先進的な研究開発テーマの選定</p> <p>① 研究開発テーマの選定</p> <p>概ね平成 26 年 9 月までに、平成 25 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業（放射性廃棄物重要基礎技術高度化調査）における海外における地層処分や代替処分技術等の最新の研究</p>

開発動向調査結果（平成 25 年度放射性廃棄物共通技術調査等事業放射性廃棄物重要基礎技術高度化調査報告書

http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/library05.htmlにて公開)を踏まえてテーマを公募し、処分に見識がある有識者（5 名程度を想定）による選考を経て、同年 10 月までに 5 テーマ程度を選定する。有識者の選定や選考委員会の実施に当たっては、資源エネルギー庁と調整、相談の上、実施する。

② 選定基準

研究開発テーマの選考・選定にあたっては、前述した平成 25 年度の調査結果等を踏まえるとともに、各分野別（地質環境調査技術、処分場の建設・操業・閉鎖にかかわる工学技術、安全評価技術、使用済燃料直接処分技術）の検討委員会での議論や、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物ワーキンググループでの議論（地層処分の社会的受容性の拡大に資する技術（回収可能性、代替オプション検討等））を踏まえた選定とする。

③ 研究実施者の公募

選定した研究テーマについて公募を行い、研究実施者の決定及び実施に必要な事務手続きなどを行う。公募の手順等については、過去の実績を踏まえ以下の通りとする。

- ・ 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センターという）のホームページ上にて公募要領を掲載する。その後 1 ヶ月程度公募を実施し応募者を募る。その際、研究開発テーマに関連した学会のメーリングリストなども活用し広く情報を伝えることに留意する。
- ・ 公募期間後に応募者から提出された提案書等について、選考委員会に諮り書類審査を行う（1 週間程度）。
- ・ 書類審査を通過した応募者を対象に、速やかに選考委員会を開催し二次審査を行う。二次審査では、研究内容に関する応募者からのプレゼンを行い、最終的な研究実施者を決定する。
- ・ 研究実施者決定後、速やかに研究が開始できるよう、原環センターは研究実施者と再委託契約を行う。なお、再委託契約に伴う全ての権利（知的財産権など）は、原環センターに原則帰属させるよう留意する。また再委託先は原環センターと同様に、秘密の保持に留意し、漏えい防止の責任を負う。

なお、公募に係る手続きなどは資源エネルギー庁の委託事業事務処理マニュアルに準拠する。また、応募者がなかった研究テーマについては、選考委員会の有識者からの推薦により研究実施者を選定することも可とする。

(2) (1) の研究開発に関する進捗管理・取りまとめ

(1) の研究開発に対して、進捗管理や成果の取りまとめを実施する。具体的には、大学等の外部有識者からなる検討委員会（親委員会及び分野別委員会（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分の4分野））を設置し、各委員会において、対応する(1)で選定した研究開発内容・進捗状況に関する中間及び最終報告を研究実施者に行わせ、チェックアンドレビューを行う。検討委員会の委員の選定（各委員会で6～8名を委員として選定することを想定）や実施に当たっては、資源エネルギー庁と調整、相談の上、実施する。

また、検討委員会では、上記に関連する「地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成25年度～平成29年度）」に示される平成26年度までの研究開発状況の中間評価も合わせて行うこととし、そのために必要な事務局（日程調整、会議場所の確保、資料の準備、議事録の作成など）も務める。研究開発状況の中間評価に関する検討委員会は、上記4分野の委員会を3回程度、親委員会を2回程度開催する。

表 1.2-1 に示した作業内容についてまとめると、以下のように整理される。

(1) 処分技術に関連する研究開発テーマの選定（平成26年度のみ実施）

- 研究開発テーマの選定（研究テーマについて選定委員会に諮り決定）
- 研究実施者の公募（実施者については選定委員会で審査・決定）

(2) 選定した研究開発に関する進捗管理・とりまとめ（平成26年度～29年度の各年度実施）

- 選定した研究開発テーマ実施に関する進捗管理・取りまとめを行い、その一環として検討委員会を設置し、研究者によるプレゼン報告（中間報告、最終報告）に対してチェックアンドレビューを実施
- 研究管理の進捗・取りまとめに関連して、全体計画に係る研究開発状況に関して、平成26年度に中間評価、及び平成27～29年度はチェックアンドレビューを検討委員会にて行う。

次節で、平成 26 年度に実施する作業計画を整理する。

1.2.1 処分技術に関連する先進的な研究開発テーマの選定に関する作業計画

前述の計画立案と実施方針を踏まえて、処分技術に関連する研究開発テーマの選定は以下の手順で進める。

- ① 処分技術に関連する研究開発テーマの選定
- ② 選定された研究テーマについて原環センターのホームページ等を用いた公募
- ③ 公募研究テーマに対して応募があった研究者について、有識者からなる委員会（選定委員会）にて書類及びプレゼン審査による選考

①については、最初に公募の基本的な考え方を整理した後に、最近の処分に係る政策や審議会の提言等、各種の委員会におけるコメント、あるいは国際的な研究開発動向を踏まえ、公募する研究テーマ（案）を取りまとめる。その後、研究テーマ（案）について選定委員会に諮ることにより公募研究テーマを最終決定する。

②については、公募研究テーマやその他の募集要領を原環センターのホームページに掲載することにより、研究実施者の応募を受け付ける。また、関連する学会等を活用して公募案内を周知する。

③については、応募のあった研究実施者について、書類審査、及びプレゼン審査の 2 段階の審査を実施し、研究テーマを実施する研究者を決定する。

1.2.2 選定した研究開発に関する進捗管理・取りまとめに関する作業計画

ここでは、以下を実施することを計画した。

・選定した研究開発に関する進捗管理・取りまとめ

- ① 検討委員会において中間報告・最終報告を行うことにより進捗管理を行う
- ② 電子メールや研究者の所属する大学等への訪問し意見交換を実施することにより進捗管理を行う
- ③ 各研究者から提出された研究報告書の概要を取りまとめる

・全体計画の中間評価

- ④ 地層処分基盤研究開発調整会議（以下、調整会議という）における全体計画の中間評価対応や全体計画改訂のための作業について、事務局として支援
- ⑤ 中間評価を行う検討委員会の運営

①については、表 1.2-1 にも示したように、大学等の外部有識者からなる検討委員会（親委員会及び分野別委員会（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分の 4 分野））を設置し、各委員会において、対応する研究開発内容・進捗状況に関する中間及び最終報告を研究実施者に行わせ、チェックアンドレビューを行う。

②については、上記のように、電子メールや各大学等への訪問により意見交換を実施し、研究の進捗について管理する。特に研究開始初年度である今年度においては、委託費管理の留意点について研究実施者に注意を払うようコミュニケーションをとる。

③については、各研究者から 2 月頃に研究報告書のドラフト版を、3 月中旬に研究報告書の最終版を原環センターに提出することにより、研究の進捗管理を行う。また、研究報告書の概要をとりまとめる。

④及び⑤については、調整会議における中間評価対応と全体計画改訂に向けて、及び検討委員会の設置・運営に関して、以下のような事務局支援を計画した。

- ・ 調整会議を活用した活動における各種会議等の開催に向けた調整
- ・ 全体計画改訂版のドラフティングにおける関連情報等の取りまとめ支援
- ・ 検討委員会における事務局機能、及び議事録取りまとめ等
- ・ 改訂された全体計画の最終版の整備（体裁調整等）
- ・ 全体計画の中間評価・見直しに資する海外文献の翻訳

2. 処分技術に関連する先進的な研究開発テーマの選定

前述したように、本事業では、平成 26 年度より 4 カ年の事業期間で高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした先進的な研究開発を実施するとともに、今後の我が国の基盤研究開発の課題を検討することで、処分実施主体が将来処分事業を進めるにあたって必要となる技術基盤の整備を図ることを目的としている。処分技術に関連する研究開発テーマの選定については、1.2.1 で述べたような手順により進めた。

2.1 処分技術に関連する研究開発テーマの選定

最初に、研究テーマの選定にあたり、大学等への委託研究の考え方について以下の方針とした。

- ・ 本事業は、国の基盤研究開発の一環として経済産業省資源エネルギー庁が実施するものであるため、大学等への委託研究テーマの設定にあたっては、基礎的な研究ではあるものの、国で実施する政策や事業に関連あるいは反映できるものであることが必要。
- ・ 処分技術に関する 5 つの分野（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分、及び社会的受容性）で最低各 1 テーマを設定。
- ・ 人材育成の観点から、公募対象者を原則 45 歳以下の研究者とする。

次に、公募する研究テーマについて、最近の処分に係る政策や審議会の提言等^{1,2,3}を考慮し、以下の①～③の視点にて選定することとした。

- ガラス固化体の地層処分の技術的信頼性向上に寄与し、国の基盤研究開発で実施中の事業の中で考慮することが難しく、かつ学術的知見が十分でないと思われる基礎的内容
- 低レベル放射性廃棄物処分において重要であり、国の基盤研究開発として実施中の事業の中で考慮することが難しく、かつ学術的知見が十分でないと思われる基礎的な内容
- 地層処分の代替オプション技術として参考になりうるもの

¹ エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）

² 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物ワーキンググループ中間取りまとめ（平成 26 年 5 月）

³ 総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会地層処分技術ワーキンググループ中間取りまとめ（平成 26 年 5 月）

また、研究テーマの抽出・検討については、上記に示すような国の政策や審議会の提言の他に、以下の基盤研究開発に関連した議論を参考に、その分析から行った。

- ・平成25年度に実施された調整会議における研究開発マップ案レビュー時の分野別委員会議事録
- ・地層処分技術ワーキンググループで抽出された技術的信頼性向上のための研究開発課題
- ・平成25年度に実施された資源エネルギー庁事業の技術評価における外部専門家からの提言
- ・平成25年度に実施された放射性廃棄物重要基礎技術高度化調査における海外の研究開発動向

図 2.1-1 に公募する研究テーマの抽出・選定に係るフロー図を示す。

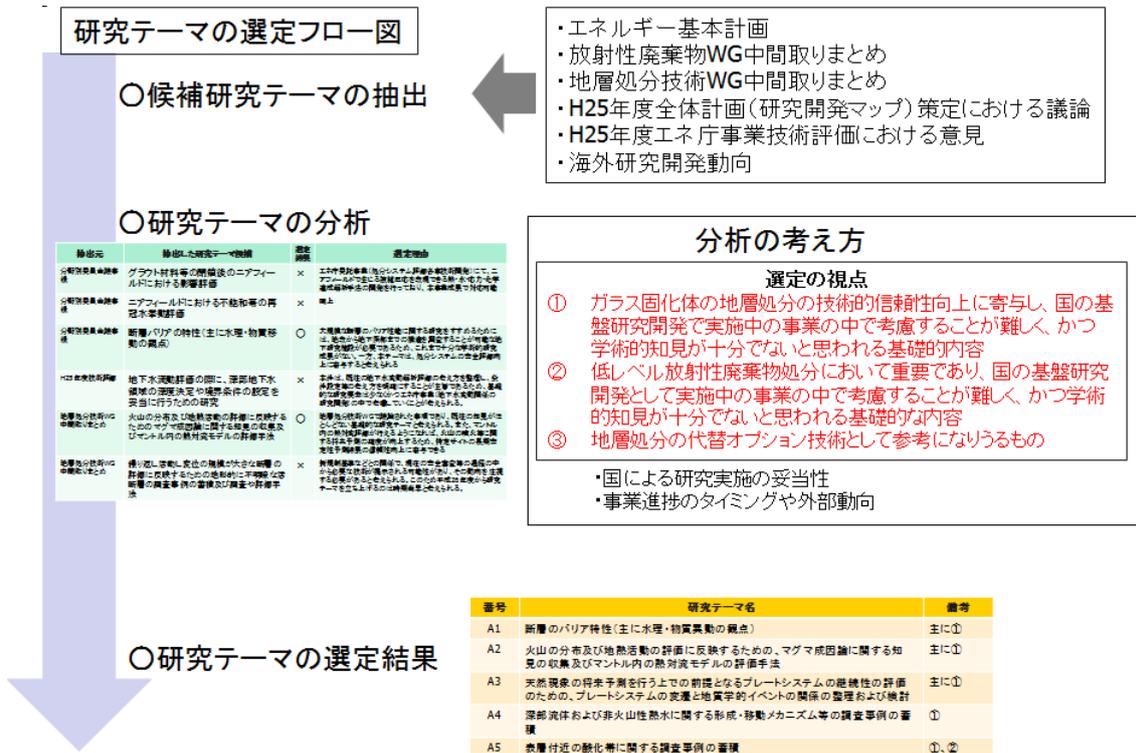


図 2.1-1 公募する研究テーマの抽出・選定に係るフロー図

図 2.1-1 に示す手順により公募する研究テーマの抽出を行った結果、地質環境分野、工学技術分野、性能評価分野、直接処分分野、社会的受容性に係る分野の研究テーマ(案)について表 2.1-1~2.1-5 のように選定した。

表 2.1-1 地質環境分野における選定研究テーマ（案）

研究テーマ
断層のバリア特性（主に水理・物質移動の観点）
火山の分布及び地熱活動の評価に反映するための、マグマ成因論に関する知見の収集及びマントル内の熱対流モデルの評価手法
天然現象の将来予測を行う上での前提となるプレートシステムの継続性の評価のための、プレートシステムの変遷と地質学的イベントの関係の整理及び検討
深部流体及び非火山性熱水に関する形成・移動メカニズム等の調査事例の蓄積
表層付近の酸化帯に関する調査事例の蓄積

表 2.1-2 工学技術分野における選定研究テーマ（案）

研究テーマ
回収・モニタリングのためのセンシング技術
オーバーパック等の新素材の長期安定性評価手法

表 2.1-3 性能評価分野における選定研究テーマ（案）

研究テーマ
ガラス溶解の長期挙動メカニズム
栄養塩の評価も含めた微生物バイオフィルムの影響
金属腐食（炭素鋼）への微生物の影響（TRU 廃棄物における硝酸塩イオンの影響も含む）
代替オプション（放射性廃棄物の管理という観点も含む）

表 2.1-4 直接処分分野における選定研究テーマ（案）

研究テーマ
放射性核種の溶出挙動（瞬時放出と UO_2 マトリックスの溶解に伴う放出）
無酸素条件における容器（銅等）の腐食に関する研究

表 2.1-5 社会的受容性における選定研究テーマ（案）

研究テーマ
リスクコミュニケーション
地層処分技術の社会との共有
地下生物圏（微生物）への放射線の影響

次に、選定した研究テーマ（案）の実施研究者を公募・選考するために本事業で設置した有識者からなる選定委員会（詳細は後述）において、選定した研究テーマ（案）の妥当性について諮った。

選定委員会における議論の結果、公募にあたっては、実施する研究の視点を示した上で研究テーマそのものも募集することとし、表 2.1-1～2.1-4 で示した研究テーマ（案）は「研究テーマ例」として公募情報に掲載することとした。また、社会的受容性に関する分野の

研究については、「社会的課題の解決に関する分野」と分野名を変更すること、また、社会的課題の解決に関する分野に関しては研究テーマ案の例示についても省略し、社会的課題解決に係る研究の考え方のみを示し、それに資する研究を幅広く募集することとした。

選定委員会での議論を踏まえて、実施する研究の視点は以下とした。

- 地層処分の技術的信頼性向上に寄与し、国の基盤研究開発で実施中の事業の中で考慮することが難しく、かつ学術的知見が十分でないと思われる基礎的内容
- 低レベル放射性廃棄物処分において重要であり、国の基盤研究開発として実施中の事業の中で考慮することが難しく、かつ学術的知見が十分でないと思われる基礎的な内容
- 社会的な課題解決に関する内容※
※社会的課題解決に関する研究については、放射性廃棄物処分の問題が技術のみならず、社会的な意思決定による課題解決を必要としていることから、国によるこのような取組みに資する研究実施を期待。

2.2 研究テーマと研究実施者の公募・選考

上記のように実施する研究の視点を示した上で、平成 26 年度より 4 ヶ年の事業期間の高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした基礎的な研究テーマ及び研究実施者の公募を実施した。公募においては原環センターのホームページに公募案内を掲載し（図 2.2-1）、また関連する学会のメーリングリスト等で案内することで公募の周知を図った。公募は平成 26 年 9 月 5 日に開始し、約一カ月後の 10 月 6 日に応募を締切った。

English | お問い合わせ | サイトマップ

公益財団法人
原子力環境整備促進・資金管理センター
Radioactive Waste Management Funding and Research Center

文字サイズ変更:
サイト内検索:

HOME > 調査情報 放射性廃棄物の地層処分に係る基礎的研究テーマ及び研究実施者の募集 [このページを印刷する](#)

メニュー

- 当法人について
- 電子公告
- 調査研究業務について
- 資金管理業務について
- 原環センターライブラリ
- 諸外国の高レベル放射性廃棄物等の状況
- 地層処分実規模試験施設
- 賛助会員について
- 情報公開資料
- 放射性廃棄物の処分について
- 放射性廃棄物関係法令等
- お知らせ
- 調査情報
- 採用情報
- リンク

調査情報

放射性廃棄物の地層処分に係る基礎的研究テーマ及び研究実施者の募集

平成26年9月5日

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター（以下、原環センター）では、経済産業省資源エネルギー庁からの委託を受けて、「放射性廃棄物重要基礎技術研究調査」事業を実施しており、その一環として、平成26年度より4か年の事業期間で高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした基礎的な研究テーマ及び研究実施者を募集します。

1. 研究開発の目的

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要があります。高レベル放射性廃棄物の地層処分や長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）をはじめとする低レベル放射性廃棄物の処理処分等に係る政策立案や研究開発については、国や関係機関、処分実施主体（原子力発電環境整備機構：NUMO）等の適切な役割分担のもとで進めていくことが重要とされています。これらの背景を踏まえて、本調査では、平成26年度より4か年の事業期間で高レベル放射性廃棄物の地層処分を中心とした基礎的な研究開発を実施するとともに、今後の我が国の基盤研究開発の課題を検討することで、処分実施主体が将来処分事業を進めるにあたって必要となる技術基盤の整備を図ることを目的としています。

2. 研究の実施方法

本研究は、国の基盤研究開発の一環として経済産業省資源エネルギー庁が実施するものであるため、基礎的な研究ではあるものの、国で実施する政策や事業に関連あるいは反映できるものと考えられ、かつ5つの分野（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分、及び社会的な課題解決に関する分野）において、以下の①～③の視点に関連した研究テーマ（テーマの例を別添資料-1の別紙に記載）及び研究実施者を公募し、選定された研究実施者に研究開発を委託することによりすすめます。

図 2-2-1 原環センターHPに掲載した公募案内（一部。応募締切後はページを削除。）

2.3 選考委員会による応募研究テーマと研究実施者の選定

本事業で実施する処分技術に関連する研究開発テーマの選定にあたり、以下の役割を担う選定委員会（委員長：朽山修（原子力安全研究協会））を設置した。

- ・ 公募研究テーマの選定の妥当性を諮る
- ・ 応募者の選考（書類審査（一次審査）、プレゼン審査（二次審査））

また選定委員会を以下のように3回開催した。

- ・ 第1回選定委員会（平成26年9月4日）－公募研究テーマの妥当性について諮る
- ・ 第2回選定委員会（平成26年10月22日）－応募者の書類審査、プレゼン審査を受ける研究者の決定
- ・ 第3回選定委員会（平成26年11月6日）－プレゼン審査による研究実施者の決定

前述したように、第 1 回選定委員会では、公募研究テーマ（案）の妥当性について諮ったが、委員会の議論の結果、実施する研究の視点を示した上で研究テーマそのものも募集することとなった。

公募に対して応募された研究テーマ及び研究実施者の選考が第 2 回選定委員会（書類審査）、第 3 回選定委員会（プレゼン審査）においてなされ、その結果、以下の 6 件の研究テーマ及び研究実施者が採択された。なお、応募者と利害関係者となる委員については、該当する研究テーマの審査には加わらないように留意した。

- ・ 断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究
柏谷公希（京都大学）
- ・ 岩石き裂の治癒作用を利用した不連続面のバリア性能向上に関する研究
奈良禎太（鳥取大学）
- ・ 天然バリアと人工バリアの力学特性を考慮した放射性廃棄物処分施設の長期的な力学挙動予測システムの開発（処分施設の建設～操業～閉鎖～）
金澤伸一（福島工業高等専門学校）
- ・ 硝酸塩影響評価のための高イオン強度下におけるアクチノイドの溶液化学的研究
小林大志（京都大学）
- ・ 地層処分の性能評価の精緻化を目指した薄片状雲母を用いた核種の収着メカニズムに関する基礎的研究
千田太詩（東北大学）
- ・ 高レベル放射性廃棄物処分に関わるアジェンダ・セッティング（政策課題設定）の基礎的研究
小松崎俊作（東京大学）

3. 研究開発に関する進捗管理・取りまとめ

本事業で選定された処分技術に関連する 6 件の研究テーマについては、平成 29 年度までの毎年度、検討委員会を設置して研究開発内容・進捗状況に関する中間及び最終報告を研究実施者に行わせ、チェックアンドレビューを行うこととしている。

平成 26 年度については、6 件の研究テーマの採択決定時期が 11 月となったこと等から、中間報告は行わず年度末頃に最終報告のみを行うこととした。

選定した 6 件の研究テーマの進捗状況のチェックアンドレビューを実施するための検討委員会（親委員会及び分野別委員会（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分の 4 分野））を設置した。なお、この検討委員会は、3.3 節で後述する全体計画の中間評価及び関係機関における研究開発の進捗に関するチェックアンドレビューも実施することとなっている。

また、上記検討委員会によるチェックアンドレビューの他に、研究実施者との間で電子メールや各研究者が所属する大学等を訪問して意見交換を行うことにより、進捗管理を実施した。

以下の 3.1 節において、6 件の選定された研究テーマの平成 26 年度の成果概要について整理する。また、3.2 節において、設置した検討委員会による、各研究者から平成 26 年度の研究成果、来年度の計画などの報告に対する評価について取りまとめる。

3.1 選定された研究テーマの平成 26 年度の成果概要

3.1.1 実施研究 1 研究者：京都大学 柏谷公希

研究テーマ：断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究

(背景・目的)

断層はその両側で変位の認められる割れ目もしくは割れ目ゾーンであり、一般に破碎帯を伴うことが多く、破碎帯を構成する破碎物質はその粒径に応じて細粒なものは断層ガウジ、粗粒なものは断層角礫と呼ばれている。一般に破碎帯は割れ目が発達していることで、母岩と比較して高い透水性を示すことが多いが、主に断層ガウジからなる細粒粘土化帯は、透水性が低く遮水構造として機能し、周辺の地下水流動を制限することが知られている。このように、断層はその内部構造に応じて地下水流動や物質移行における主要な経路（パス）と障壁（バリア）の両方の機能を有すると考えられている。断層の内部構造や不均質性を踏まえ、断層破碎帯が周辺の地下水流動や物質移行に及ぼす影響を明らかにすることにより、より実現象に即した核種移行解析が可能となり、地層処分の安全評価における地下水シナリオの評価を高度化する上で貢献すると考えられる。

上記を背景として本研究では、断層周辺の地下水流動および物質移行における断層のパスあるいはバリアとしての機能を明らかにすることを目的とする。さらに、断層の地下水流動および物質移行におけるパス、バリアとしての機能を評価するための手法を構築することを目的とする。

(平成 26 年度の実施計画)

本研究では、断層周辺の地下水流動や物質移行に関わる物理的特性、化学的特性の空間分布を明らかにし、これら空間分布に基づいて地下水流動シミュレーションと反応輸送シミュレーションを行う。シミュレーション結果は環境トレーサー分析の結果と比較することで検証する。

平成 26 年度は、日本に分布する断層を対象に文献調査を行い、研究対象となる断層を選定する。本研究で研究対象とする断層に求められる条件として、断層角礫と断層ガウジを

伴い、断層周辺の地下水流動や物質移行を制限する構造、密な時間的・空間的間隔で断層周辺の測定地点が明らかな水文・水理・地質・地化学に関するデータが利用可能であること、露頭やコア試料で断層の観察・各種測定やサンプリングが可能であること、等が挙げられる。日本国内に分布する断層のうち上述の条件を満たす可能性のある断層として、月吉断層・主立坑断層、跡津川断層系、野島断層について文献調査を行い概要を整理した。また、近年地下水の環境トレーサーとして分析される機会が増えており、本研究では断層周辺の地下水流動状態を把握し、シミュレーション結果の検証を行う上で有効な指標物質となりことが期待される六フッ化硫黄を分析するための前処理装置を作製する。

(平成 26 年度の成果概要)

主立坑断層と月吉断層の周辺では、日本原子力研究開発機構 (JAEA) 瑞浪超深地層研究所を中心に様々な項目の調査・モニタリングが行われており、本研究で必要となる断層周辺の水文・水理・地質・地化学などに関するデータが蓄積・公開されている。また、主立坑断層の直近に研究坑道が位置しており、断層の観察・原位置計測・サンプリングが可能である。さらに、広域的な地質構造や地下水流動状態に関するデータも得られており、断層周辺のサイトスケールで解析を実施する上で境界条件を設定しやすい。以上を考慮し、主に主立坑断層を対象に、月吉断層を比較対象として研究を実施することとした。

また、断層周辺における地下水流動と物質移行のシミュレーションと比較するための環境トレーサー試験として用いる SF₆ トレーサーの分析を行うための前準備として、Purge and trap GC-ECD 法による SF₆ 分析で使用する分析前処理装置を作製し、分析のためのプロトコルを整備した。次年度以降、本装置を用いた SF₆ 分析を本格的にスタートさせ、まずは本装置で得られる分析値を他研究室の装置による分析結果と相互比較し、その信頼性を検証する。また、繰り返し精度、定量下限濃度などの検証を行った上で地下水試料の分析を開始する計画とする。

3.1.2 実施研究 2 研究者：鳥取大学 奈良禎太

研究テーマ：岩石き裂の治癒作用を利用した不連続面のバリア性能向上に関する研究

(背景・目的)

放射性廃棄物の地層処分においては、岩盤を天然バリアとして使用する。このことから、岩盤には高い長期強度と遮蔽性が要求される。岩盤内では、き裂や空隙のネットワークが流体の流路となるため、遮蔽性向上には、き裂の進展を防ぐとともに、き裂や空隙を閉塞させることが効果的であると考えられる。日本では地殻運動が活発であり、地下には断層や節理などの不連続面が数多く分布するが、巨視き裂を含む火成岩では、巨視き裂に断層粘土を含めることにより、透水係数が低下することが期待される。また、岩石とコンクリートを水中に一緒に保存すると、岩石表面にカルシウム化合物が析出することが示されており、これらの効果を利用すれば、治癒した節理や断層を利用する形で岩石の遮蔽性を高められる可能性があり、放射性廃棄物処分で大いに役立つ技術の可能性が期待される。ただし現状では、節理や断層がどの程度バリア性能を有するかについては十分には検討されていない。

本研究では、岩石内の節理や断層の遮蔽性（バリア性能）を、破壊力学試験と透水試験を用いて調べる。特に、岩石のき裂進展とその閉塞を同時に起こす試験を行い、さらに、閉塞に寄与した析出物の同定を行うことにより、析出物の力学的耐久性を理解する。また、節理や断層等の不連続面を有する試験片を用いて透水試験を行うことにより、断層や節理のバリア性能を向上させ、その基礎情報を得ることを目標とする。

(平成 26 年度の実施計画)

平成 26 年度は、破壊力学および透水試験を行う環境を整備し、予備試験を実施した。特に、破壊力学試験法であるダブルトーション法による測定を予備実験として 1～2 週間程度連続で行うことにより、長期連続測定によるき裂進展データ取得環境を整備した。透水試験に関しては、岩石試料（花崗岩）を用いて透水試験の予備実験を行うことにより、岩石の遮蔽性（バリア性能）に関するデータ取得環境を整備した。

(平成 26 年度の成果概要)

破壊力学試験については、ダブルトーション試験装置を恒温恒湿器内に組み立てることによって、長期間周辺環境を一定に保てる破壊力学試験装置を整備した。さらに、応力拡大係数とき裂進展速度のデータを長期間にわたって取得できるようにするため、データ取得間隔を長期にわたって制御できるデータロガーとデータ取得用のパソコンを試験装置に接続することによって、長期間連続してダブルトーション試験を行えるように実験環境を整備した。また、大島花崗岩を試料として用いて予備試験を行った結果、10日間の連続測定により、き裂進展限界の検出には至らなかったものの、従来よりも低いき裂進展速度の測定に成功し、応力拡大係数とき裂進展速度の関係を得られることを確認した。

透水試験については、稲田花崗岩を試料として、トランジェントパルス法による透水試験の予備試験を行った。その結果、試験装置が問題なく作動し、岩石の透水係数に関するデータが得られることを確認した。

今後は破壊力学試験については、き裂進展限界を検出するために、極めて低いき裂進展速度を測定するとともに、き裂修復が起りやすい環境で長期間にわたって試験を行う。また、透水試験では、今後は不連続面を含む天然の試料を用いて透水試験を行い、実際の断層が有する遮蔽性能を調べることとする。

3.1.3 実施研究 3 研究者：福島工業高等専門学校 金澤伸一

研究テーマ：天然バリアと人工バリアの力学特性を考慮した放射性廃棄物処分施設の長期的な力学挙動予測システムの開発

(背景・目的)

地層処分施設の長期予測解析において、人工バリア（以下、ベントナイト緩衝材）の再冠水時の不飽和状態での膨潤挙動と、その後の飽和時の圧密などの挙動は別々に検討されており、連続的に解かれた例がない。また、天然バリア（以下、岩盤）とベントナイト緩衝材の相互関係の力学挙動を解析した例も無い。しかしながら、近年では個々の事象の予測技術が開発・高度化され、岩盤を含めた処分施設の建設から超長期にわたる挙動を連続的に解析できるところまできている。

本研究では、処分施設の建設から閉鎖までの期間に着目し、岩盤とベントナイト緩衝材の力学特性を考慮できるモデルを組み込んだ、熱／土／水／空気連成有限要素解析を実施し、建設から供用までの力学挙動を連続して解くことで、岩盤とベントナイト緩衝材の長期的（数十万年オーダー）な力学的相互作用を把握することを目的とする。さらに、解析条件の選定や解析結果の評価方法までの一連の流れを整備し、処分施設の長期的力学挙動の予測システムを開発することを目標とする。

(平成 26 年度の実施計画)

本年度は、ベントナイトに関する温度変化の影響を考慮した膨潤量・膨潤圧試験、温度変化を考慮した圧密試験、温度変化による一軸強度データを取得する試験環境の整備を行う。さらに、地下空洞の安定性に対する有限要素法（FEM）解析手法の確率に向けて、解析に必要な初期条件・境界条件、さらにはパラメータの抽出を試みる。それに加え、岩盤の長期挙動を表現できる構成モデルの定式化と解析コードへの組み込みを行う。

(平成 26 年度の成果概要)

温度変化を考慮した圧密特性の把握のための試験機については、通常の圧密試験と同様

の試験を行えながらも、高圧力まで荷重を与えられるように、かつ温度変化を考慮できるように圧密試験機を改良した。ベントナイト緩衝材の温度変化に伴う膨潤量・膨潤圧の特性把握のため、温度変化（室温～99℃まで10℃刻み）させて膨潤量・膨潤圧を測定できるように圧密試験機を改良した。さらに、ベントナイト緩衝材の温度変化にともなう一軸圧縮強度を測定できるように試験環境を整えた。

解析シミュレータの開発・高度化については、地下空洞の安定性を確認するためのFEM解析のために、FEM解析コードにコンプライアンス可変型構成式である大久保モデルを組み込んだ。また、開発した解析コードの検証として、一軸圧縮試験解析を行ったところ、通常の一軸圧縮試験と同様にピーク強度（正規化応力-正規化ひずみ）が表れ、その後軟化する傾向が示された。このことから、コンプライアンス可変型を組み込んだプログラムが正しく計算されていることが確認された。

3.1.4 実施研究 4 研究者：京都大学 小林大志

研究テーマ：硝酸塩影響評価のための高イオン強度下におけるアクチノイドの溶液化学的研究

(背景・目的)

TRU 廃棄物の中で、濃縮廃液固化体等の主にグループ 3 の廃棄物は多量の硝酸塩を含み、核種の収着性や核種の溶解度に影響を及ぼす可能性が指摘されている。TRU 廃棄物に含まれる硝酸塩が処分施設内や近傍においてアクチノイドの移行挙動に与える影響を定量的に評価するため、高濃度硝酸ナトリウム溶液中でのアクチノイドの錯生成、酸化還元、コロイド挙動について検討するとともに、反応に関わる熱力学データを取得する。高イオン強度下でのアクチノイドの熱力学モデルを提案し、硝酸塩影響下でのアクチノイドの化学的挙動の理解及びその定量的評価につなげる。

(平成 26 年度の実施計画)

本年度は、次年度において計画している高イオン強度下での 4 価アクチノイドの錯生成反応に関連する文献の調査を行い、これまでの知見を整理する。また、高イオン強度下での実験に先立ち、幅広いイオン強度下での既知試料の pH および Eh を測定し、それぞれの測定値のイオン強度補正について検討する。

(平成 26 年度の成果概要)

本研究で対象とする 4 価ジルコニウム、トリウムおよびプルトニウムについて、硝酸錯体および炭酸錯体の熱力学データに関する調査を行った。「4 価金属と硝酸イオン」の錯生成反応については、地下水条件下 (中性～アルカリ性 pH) では硝酸錯体の寄与は低下するが、イオン相互作用係数が寄与することが報告されていたことが明らかとなった。また、炭酸イオンとの錯体形成では、Zr、Th、Pu の種類によって異なる炭酸錯体化学種がほうこくされていること、一方で、高イオン強度における実験値は不足しており、高イオン強度での炭酸錯体を含む溶解度評価には、高イオン強度下での炭酸錯体の熱力学データが必要である

ことが考えられた。さらに4価金属の加水分解反応のデータから、4価水酸化物コロイド種の挙動について、熱力学的な解釈が可能であることが示唆された。今後は高硝酸塩濃度条件下での水酸化物コロイド種の生成や凝集等の挙動について熱力学的な解釈を可能とし、溶解度熱力学モデルに反映することを目指す。

また、高イオン強度下での実験・測定に向けた予備実験として、高濃度の NaNO_3 および NaCl 溶液下での pH 測定および Eh 測定を行い、pH については実測値から水素イオン濃度 (pHc) を決定するための換算係数を各イオン強度において求めた。Eh については、安定な酸化剤、還元剤の組み合わせである $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の Eh 値を低濃度から高濃度までの NaNO_3 および NaCl 溶液下で測定した。その結果、 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の場合、Eh 値のイオン強度依存性は SIT により良く再現できることが分かった。

次年度は本年度の結果を元に、高イオン強度 (NaNO_3) 下での溶解度実験を開始し、錯生成反応およびコロイド生成挙動に及ぼす NaNO_3 濃度の影響について検討を進める。

3.1.5 実施研究 5 研究者：東北大学 千田太詩

研究テーマ：地層処分の性能評価の精緻化を目指した薄片状雲母を用いた核種の収着メカニズムに関する基礎的研究

(背景・目的)

地層処分システムの天然バリアレファレンスとして使用されている花崗岩については、構成鉱物の一つである黒雲母が高い核種収着性を示すことが知られており、このことにより花崗岩の有する核種移行遅延効果への寄与が大きいと考えられている。一方で、既往の核種収着データのほとんどは一定粒径に粉碎された粉末試料を用いた収着試験によって取得されているため、実際の地下環境における鉱物の物理的および化学的特性を十分に反映できていないと考えられている。実際の地下環境においては、黒雲母は粉碎状態ではなく、花崗岩内に薄片の形状で含有すると想定され、核種収着はその劈開面および断口部で異なると考えられている。

本研究では、雲母の異方性が核種収着挙動に与える影響について基礎的知見を取得し、核種移行評価への反映方法を併せて提示することにより、天然バリア中の核種移行評価(地層処分システムの性能評価)に資することを目的とする。具体的には、薄片状雲母を用いた核種取り込みを実験的手法により調べ、雲母が有する異方性が核種収着挙動に与える影響について基礎的知見を取得する。さらに、取得データをもとにした拡散・収着を考慮した二次元数値解析を実施するとともに、雲母薄片への核種収着に重要となる因子を整理し、核種移行評価への反映手法を提示する。

(平成 26 年度の実施計画)

平成 26 年度は、黒雲母薄片および緑泥石を用いた Eu の収着試験に着手する。また、収着試験後の黒雲母薄片を用いた蛍光分光分析および SIMS 分析について、本研究の収着試験条件における黒雲母薄片内の Eu の拡散挙動観察に適した分析条件の設定を行う。

(平成 26 年度の成果概要)

黒雲母薄片を用いた Eu(III)の収着試験では、試験開始後に水溶液中の Eu 濃度が急激に減少したが、その後減少は緩やかになった。試験結果から、固相表面に Eu(III)が収着した後、K とのイオン交換を伴いながら層間内部へ収着および拡散が進行するメカニズムが考えられた。既往研究では粉碎した黒雲母試料に多量に存在する断口部への速やかな核種収着が観察されたのみであるのに対し、実環境に近い形状である薄片状試料対しては収着と拡散という二つの過程が存在すると考えられ、花崗岩表面に断口部が露出する確率が高い黒雲母には更なる核種遅延効果が期待できる可能性が示唆された。また、蛍光分光分析および SIMS 分析の測定条件検討は実施計画の予定通り進められ、次年度以降のデータ取得に臨む準備が整えることができた。

次年度は、適切な経時変化取得を考慮しながら Eu(III)の収着試験を継続する。本年度に開始した低 pH 領域の収着挙動に加え、次年度では実際の処分環境における地下水 pH を想定した中性領域(pH 8 程度)における Eu(III)の収着挙動について調べる。また、蛍光分光分析や SIMS 分析によって、収着挙動のメカニズムに関して検討する。

3.1.6 実施研究 6 研究者：東京大学 小松崎俊作

研究テーマ：高レベル放射性廃棄物処分に関わるアジェンダ・セッティング（政策課題設定）の基礎的研究

（背景・目的）

東日本大震災および福島第一原子力発電所事故は、それまで気候変動対策やエネルギー安全保障などの観点から世界各国で推進の気運が高まっていた原子力発電政策を大きく転換するきっかけとなり、各国で改めて脱原発を含めたエネルギー政策論争が巻き起こっている。一方で、事故によって放射性廃棄物処分に対する社会的認知が高まったにも関わらず、最も重要な高レベル放射性廃棄物の最終処分施設立地についての政策的議論は、これまでのところ実質的にはほぼ進展がなかった。高レベル放射性廃棄物処分を実現するためには、社会全体が処分を「今意思決定・実施すべき政策である」という意識を共有すること、すなわちアジェンダ・セッティング（政策課題設定）が不可欠である。

本研究では、処分事業に対する国民・社会の理解促進と信頼性向上をはかる上での前提条件となるアジェンダ・セッティングについての研究を通じて、社会的意思決定に関わる研究の効率的な進展に貢献し、処分事業の社会的側面に関する理解を深めることを最終目標とする。そのために、本研究は（1）高レベル放射性廃棄物処分のためのアジェンダが設定されるための要因を抽出し、（2）我が国における高レベル放射性廃棄物処分のために有効なアジェンダ・セッティングのあり方を提示することを目的とする。

（平成 26 年度の実施計画）

平成 26 年度は、既存の様々な分野におけるアジェンダ・セッティング成功事例について政治過程分析を行い、アジェンダ・セッティングが起こる要因を抽出し、アジェンダ・セッティングの類型化を試みる。そのために、既往研究のレビューや専門家らへの聞き取り調査、アジェンダ・セッティングの類型化に関する仮説構築のための予備的社会調査を実施する。

また、以前平成 22～24 年度に実施されたアンケート調査のデータについて社会心理学的分析を行い、震災ならびに福島第一原子力発電所事故が高レベル放射性廃棄物処分政策や

原子力政策に対するステークホルダーの態度に与えた影響を分析する。さらに、以前の調査におけるパネルデータを維持しつつ、人々の態度形成やアジェンダ・セッティングに関わる Web アンケート調査を実施する。

(平成 26 年度の成果概要)

アジェンダ・セッティングが行われた事例の全体像を把握するために、医師不足、郵政民営化、ドイツのシュレーダー政権下における脱原発の決定等のアジェンダ・セッティングが行われた事例を 10 個選定し、次に、それぞれの事例についてその政策過程を分析した。分析結果をもとに、政策目標のパラダイムシフトが政府内において起きているか否かと、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターが政治アクターであるのか政策専門家であるのかによって、アジェンダ・セッティングの類型化と事例を分類した。その結果から、本研究で得た類型化（仮説）に基づけば、放射性廃棄物処分に関するアジェンダ・セッティングは、官僚ないし専門家が、当該政策課題とは離れた領域における小さな政策による波及効果で起こすことを目指すというオプションが提示された。今後、引き続き原子力発電ならびに放射性廃棄物分野におけるアジェンダ・セッティングの事例分析を深めて同分野の特異性を明らかにするとともに、仮説的に得たアジェンダ・セッティングの類型を用いてアナロジーによるアジェンダ・セッティングのデザイン手法を確立することを目指す。それにより、アジェンダ・セッティングの可能性を精緻に検討し、より効果的なプロセスを設計する。

また、人々の行政に対する信頼、公正感、高レベル放射性廃棄物（HLW）処分事業に対する態度、科学・政治知識などについて検討するため Web を用いたアンケート調査を行った。調査結果については、震災直前に実施したアンケート調査結果との比較を行い、震災・原発事故の影響を推定するとともに、その経年変化を分析した。HLW 処分施設受け入れへの態度の変化については、震災後に一時受け入れに好意的に転じていた態度が、震災 2 年後の 2013 年の調査では一転して大幅に低下（否定的に変化）していた。また、被害規模の認知は事故後に有意に上昇した後は変化せず、また、原子力発電のメリットと従来考えられていた経済性認知は継続して低下し続けていた。このような原子力関連施設に対する認識が、HLW 処分施設受け入れへの態度において否定的な結果につながっていることが示唆された。

3.2 検討委員会による平成 26 年度の研究成果に対する評価

本年度選定した 6 件の研究テーマについて、設置した検討委員会（委員長：朽山修（原子力安全研究協会））において 26 年度実施内容等のチェックアンドレビューを以下の日程で行った。

放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 平成 26 年度 第 1 回検討委員会（公募研究評価）

日時：平成 27 年 3 月 12 日（木） 10：30～16：15

場所：経済産業省本館 17 階第 6 共用会議室

各研究者から平成 26 年度の研究成果、来年度の計画等の報告について 30 分行き、その後委員からの質疑応答・評価記入を 15 分行った。

評価では、以下の項目について評価点数を付け、また H26 年度の研究に対する意見、次年度の研究の方向性等に対するアドバイス等を自由意見として記入する形式で行った。

- ・ 実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。
- ・ 初年度の研究として優れた研究成果が得られているか（※）
- ・ 実施研究は新規性・独創性があるか
- ・ 実施研究は地層処分への寄与が期待できるか
- ・ 次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か
- ・ 成果発表は十分か（※）

（※）平成 26 年度は研究実施の初年度であるため、参考評価とした。

以下に、各研究テーマに対する評価結果を整理する。なお、研究実施者と利害関係者となる委員については、該当研究テーマに対する評価を参考扱いとし評価点数は使用せず、平均評価点数は有効評価人数によって算出した。

平成 26 年度第 1 回検討委員会（公募研究評価）評価結果（その 1）

研究 テーマ	断層周辺の地下水流動特性および物質移行特性に関する包括的研究 柏谷 公希（京都大学）	
評価項目		評価
・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。		3.4
・初年度の研究として優れた研究成果が得られているか（※）		3.0
・実施研究は新規性・独創性があるか		3.4
・実施研究は地層処分への寄与が期待できるか		3.8
・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か		3.8
・成果発表は十分か（※）		3.0
自由 意見	<p>あまり安全評価シナリオの設定にとらわれずにタイトルの目的に沿って研究を進めて下さい。</p> <p>断層破碎帯のバリア機能を導入するためのデータが取得できるか。（そもそもそれを求めているか） 断層の描情（現在、過去、未来）を作成してほしい。</p> <p>既に存在する SF₆ を利用する点は非常に面白い。Sampling 時の圧力維持に留意されると良いと思います。</p> <p>断層周辺における物質移動などのシミュレーション手法を、最終的に実環境中トレーサー濃度等を採取する際の工夫・留意点なども併せて整理して頂きたい。</p> <p>瑞浪の主立抗断層、月吉断層を対象として進めるにあたって、これまでの構造モデルにとらわれることなく、処分システム（特に処分パネルに取り込むための）にどう反映するのも併せて検討する方法、判断のクライテリアを提示できる/することも実施していただきたい。期待しています。</p>	

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

（※）平成 26 年度は研究実施の初年度であるため参考評価

平成 26 年度第 1 回検討委員会（公募研究評価）評価結果（その 2）

研究 テーマ	岩石き裂の治癒作用を利用した不連続面のバリア性能向上に関する研究 奈良 禎太（鳥取大学）	
	評価項目	評価
	・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.4
	・初年度の研究として優れた研究成果が得られているか（※）	3.5
	・実施研究は新規性・独創性があるか	3.2
	・実施研究は地層処分への寄与が期待できるか	3.4
	・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.2
	・成果発表は十分か（※）	3.3
自由 意見	<p>「亀裂の修復」という言葉で何を見ようとしているのか、「修復」は自然におこるのか、人為的に起こそうとしているのか、全体のシステムの中でどのように効果が現れると考えているのか、全体像を見て整理して下さい。</p> <p>亀裂の進展と液性の関係についても詳しく調査してほしい。 亀裂鉱物の充填状態と透水係数の関係を明らかにしてほしい。 EDZ 部の修復と元々の自然亀裂の修復とを区別して目的と手法を考えて欲しい。</p> <p>亀裂媒体では亀裂の閉塞性と同時に亀裂同士の連結性が重要だと思っています。亀裂の進展も面白いテーマですが、亀裂の閉塞に重点を絞ることも有意義かと思っています。その際、コンクリート支保工の溶解に伴うアルカリ・ブルームによる岩の溶解と亀裂修復の 2 つの相反する効果の競合反応になると思います。</p> <p>亀裂の修復について、修復とはどの状態を指すのかをより明確にする必要があります。（透水係数が、「亀裂がない場合」に戻ることを指すのでしょうか？） 現場レベルによる検証はご提案の様に大変重要だと存じます。 是非に進めていただければと存じます。</p> <p>割れ目シーリングのメカニズムについての現状の仮定・仮説も踏まえた上で、実験の手法検討、目的、ゴールの設定を再度、研究 Gr 内で検討されてはいかがでしょうか。</p> <p>特に処分とどうリンクするかが明確になればユニークな研究になると考えます。</p>	

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

（※）平成 26 年度は研究実施の初年度であるため参考評価

平成 26 年度第 1 回検討委員会（公募研究評価）評価結果（その 3）

研究 テーマ	天然バリアと人工バリアの力学特性を考慮した放射性廃棄物処分施設の 長期的な力学挙動予測システムの開発 金澤 伸一（福島高専）	
	評価項目	評価
	・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.2
	・初年度の研究として優れた研究成果が得られているか（※）	3.0
	・実施研究は新規性・独創性があるか	3.2
	・実施研究は地層処分への寄与が期待できるか	3.2
	・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.4
	・成果発表は十分か（※）	3.0
自由 意見	<p>熱/土/水/空気の連成とは何をどのようにモデル化したものか、どのような根拠でそうしたのか、十分な考察が必要と思います。</p> <p>熱の解析に関して、全体温度だけでなく廃棄体の発熱や外部熱（例えばマグマの近接）等も評価できるようにすることが望ましい。 ベントナイトの流出についても検討をお願いしたい。</p> <p>ヘンリー則の適用性について、ベントナイト層の内部間隙水と外部間隙水では化学ポテンシャル（水の）が相当異なるので、ヘンリー定数そのものの再評価が重要なのではないかと考えます。</p> <p>岩盤・ベントナイトの熱-土-水-空気 連成モデルについて、従来のツールとの違いを明確にする必要があります。熱や深地層を連成考慮した計算するツールがあると存じます。空気の地下水への溶解現象を扱うことが新しいのでしょうか？再冠水は段階があり、埋戻しを行う前に緩衝材の冠水が始まり、（埋戻し前の）坑道に空気が抜けることが考えられます。さらにベントナイトを固相として考えるのであれば、（気相の液相への）溶存過程がヘンリー型の速度式に従うかは検討を要すると思います。</p> <p>アプローチについてはチャレンジングで興味を持つ。一方で、モデルの積み上げ方や、最終ゴールの確認方法（可能か否かも含め）疑問を持たざるを得ない部分もあるので、その辺の検討も含め今後研究を進めて頂きたい。</p>	

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

（※）平成 26 年度は研究実施の初年度であるため参考評価

平成 26 年度第 1 回検討委員会（公募研究評価）評価結果（その 4）

研究 テーマ	硝酸塩影響評価のための高イオン強度下における アクチノイドの溶液化学的研究 小林 大志（京都大学）	
	評価項目	評価
	・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	4.0
	・初年度の研究として優れた研究成果が得られているか（※）	3.5
	・実施研究は新規性・独創性があるか	4.2
	・実施研究は地層処分への寄与が期待できるか	3.8
	・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	4.0
	・成果発表は十分か（※）	3.3
自由 意見	<p>4 価アクチノイドの溶液化学的評価は重要なので、進められている内容に同意しますが、NO_3^-の酸化還元影響は非常に大事なので、これについて調べるという目的を忘れない様にして下さい。</p> <p>沈殿生成やコロイドの性質（ゼータ電位、粒径等）についての知見が期待される。課題として、真性コロイドと疑似コロイドの区別等注意が必要。試薬中の不純物（Fe）にも注意が必要。</p> <p>コロイドの粒径とゼータ電位との関係に何らかの相関が得られると、今後の理論展開の上で非常に有益な情報となることが期待できます。疑似コロイドの生成の理解に向けて検討して頂くと、尚良いと思われれます。</p> <p>高濃度 NaNO_3 溶液下のアクチノイドの溶液化学の構築は地層処分の基礎的研究において重要であり、SIT におけるイオン相互作用係数に及ぼす NO_3^- の影響に言及していくなど興味深い。最終的に収着分配、移流分散モデルへ反映するのであれば溶解度制限固相など固相共存における本研究の適用についても併せて考えて頂ければより地層処分への寄与が明確になると考える。また酸化性と還元性との違いについても言及してほしい。</p> <p>TRU、地層処分を（将来的に）意識した場合の地下環境あるいは処分坑道近傍環境（例えばコンクリート）との反応後の核種移行として、TRU 廃棄物中のどういった元素（錯体）が鍵になるのか、etc の観点からもう少し追求されることを期待します。</p>	

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

（※）平成 26 年度は研究実施の初年度であるため参考評価

平成 26 年度第 1 回検討委員会（公募研究評価）評価結果（その 5）

研究 テーマ	地層処分の性能評価の精緻化を目指した薄片状雲母を用いた 核種の収着メカニズムに関する基礎的研究 千田 太詩（東北大学）	
	評価項目	評価
	・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.5
	・初年度の研究として優れた研究成果が得られているか（※）	3.7
	・実施研究は新規性・独創性があるか	3.5
	・実施研究は地層処分への寄与が期待できるか	3.3
	・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.8
	・成果発表は十分か（※）	3.7
自由 意見	<p>岩石に対する収着がどのような機構で実現されているのかを考える基礎的研究であるとの認識で問題を整理されて、研究の意味を考えて下さい。</p> <p>雲母との Eu の収着についてイオン交換 ($K^+ \rightleftharpoons Eu^{3+}$) を確認できている。雲母の変質を考慮した計画になっている。</p> <p>マクロスコピックな岩盤の亀裂と、黒雲母の層状構造とのサイズの違いが研究の中で明確に区別して整理されると良いでしょう。</p> <p>花崗岩における水路は過去、熱水等による変質を受けた場合があることを考慮し、緑泥石等にも言及する。今後、専門家などとも意見交換も深めて行ってほしい。また性能評価上はマトリックス拡散とマトリックスにおける比較的変質を受けていない鉱物との相互作用が大切になる。マトリックスへの拡散速度と雲母中での核種の拡散係数とのバランスに着目することが望まれます。</p> <p>地下（水みちとしての）花崗岩（結晶質岩）への応用としての工夫をもう少し検討されてはいかがでしょうか。基本的手法の開発アプローチとしては重要と考えますので、それでどう展開するかが、あとは重要になるかと思えます。期待しています。</p>	

(注) 評価点数は 5（高い）～1（低い）

(※) 平成 26 年度は研究実施の初年度であるため参考評価

平成 26 年度第 1 回検討委員会（公募研究評価）評価結果（その 6）

研究 テーマ	高レベル放射性廃棄物処分に関わる アジェンダ・セッティング（政策課題設定）の基礎的研究 小松崎 俊作（東京大学）	
	評価項目	評価
	・実施研究は計画通りに進められているか。進められていない場合、改善のための工夫や計画の変更を適切に行っているか。	3.6
	・初年度の研究として優れた研究成果が得られているか（※）	3.3
	・実施研究は新規性・独創性があるか	3.4
	・実施研究は地層処分への寄与が期待できるか	3.6
	・次年度以降の研究計画・スケジュールは妥当か	3.2
	・成果発表は十分か（※）	3.0
自由 意見	<p>社会心理学・政治心理学的観点を含めてアジェンダ・セッティングを考えるアプローチは大変示唆に富んでいると思います。</p> <p>アクターにマスコミを入れるべきではないか？ 高知（東洋町）での誘地の失敗原因についてどのように考えるか？ 小・中・高 教育関係者へのアンケートはとられているか？</p> <p>1 F の事故前後の意識調査の結果に、予想外に変化が少なかった様に感じました。ある意味で非常に面白いデータですが、その理由が何によるものなのか、分析が進む事を期待します。</p> <p>1 F の事故が HLW 処分の議論につながらない事が、これまでのアンケート調査から明らかになるロジックがよく分かりません。</p> <p>H26 年度の成果として「当該政策課題と離れた領域における政策による波及」は特に興味深いと思っております。その様な過去の事例を多く示して頂ければと存じます。</p> <p>実施期間が限られていたこともありで、まだ直接的な調査はなされていない感があるが、今後のアジェンダ・セッティングのあり方には興味があり、成果を期待したい。</p> <p>1 つのコメントとして、アンケートの内容、実施方法についても次回説明をして頂けたらと考える。</p>	

（注）評価点数は 5（高い）～1（低い）

（※）平成 26 年度は研究実施の初年度であるため参考評価

3.3 地層処分基盤研究開発に関する進捗状況の中間評価とチェックアンドレビュー

平成 17 年 7 月に設置された調整会議の活動をとおして、わが国における地層処分に関する国の基盤研究開発に関する全体計画の初版が平成 18 年 12 月に公表された[1][2](平成 21 年 7 月に改訂版公開)。また、平成 22 年には地層処分と TRU 廃棄物の地層処分に関する全体計画が統合された改訂版の全体計画が公表された[3]。

その後、平成 24 年度に、平成 25～29 年度における地層処分に関する国の基盤研究開発の方針に関する全体計画[4]が策定され、さらに平成 25 年度において、その全体計画に沿って展開される詳細な研究開発計画（研究開発マップ）[5]が策定された。

全体計画（平成 25 年度～平成 29 年度）では、地質環境、工学技術、性能評価分野について平成 26 年度に中間評価を行い、見直しを実施することとなっている（図 3.2-1 参照）。

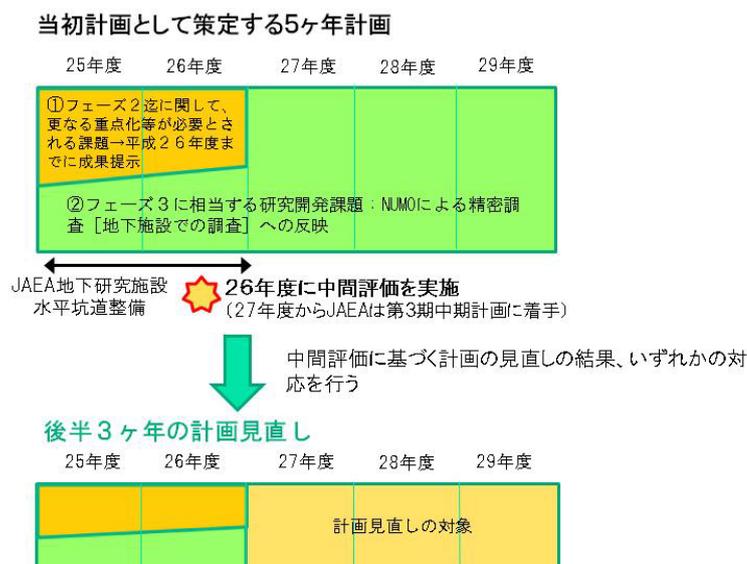


図 3.2-1 地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成 25 年度～29 年度）の研究開発課題とマネジメント

また、中間評価においては、全体計画に示されているフェーズ 2 の重点化課題及びフェーズ 3 の課題について、それぞれ次の視点で評価を行うこととしている。

- フェーズ 2 の重点化課題：平成 26 年度までの成果（予定）の確認と今後の継続の必要性（他の課題への発展を含む）
- フェーズ 3：平成 26 年度までの進捗状況の確認・レビューと計画・目標の見直しの必要性

上記を踏まえて本事業では、全体計画（平成 25 年度～平成 29 年度）に示された地層処分基盤研究開発に関する研究開発課題の実施状況の中間評価・チェックアンドレビューを実施することを目的として、検討委員会（親委員会及び分野別委員会（地質環境、工学技術、性能評価、直接処分の 4 分野））を設置した。3 章冒頭で述べたように、検討委員会では、選定した処分技術に関する研究テーマの研究開発内容・進捗状況に関するチェックアンドレビューも実施する。

・調整会議における中間評価実施のための対応

調整会議では、検討委員会による評価を受けるための検討に着手し、上記で示されている 2 つの視点にあるように、フェーズ 2 の重点化課題の成果及び今後の継続の必要性について、また、フェーズ 3 の研究開発課題に関しては平成 26 年度までの進捗状況の確認・レビューと計画・目標の見直しの必要性について整理することとした。

また、全体計画の中間評価及び改訂について、以下の事項などを考慮しながら検討をすることとした。

- ✓ 独立行政法人日本原子力研究開発機構（JAEA）の第 3 期中期計画との整合性
- ✓ 平成 26 年 9 月末までに策定される、精密調査の段階に資するための瑞浪及び幌延の調査研究の成果とりまとめ、及び深地層の研究施設計画
- ✓ エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会放射性廃棄物ワーキンググループ及び同地層処分技術ワーキンググループの中間とりまとめ（平成 26 年 5 月）
- ✓ 東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた取組に関連し、放射性廃棄物の処理・処分に関する研究開発計画動向
- ✓ 平成 25 年度外部有識者委員会における委員の意見
- ✓ NUMOの技術開発ニーズ（特に、技術開発成果の取りまとめ関連）

なお、TRU 廃棄物処分技術分野に関する研究開発課題については、中間評価時点で工学技術及び性能評価分野への完全な統合を行うこととしている。しかしながら、今回の改訂において TRU 廃棄物処分技術分野の課題について性能評価分野、工学技術分野に統合する方針としていたが、統合する作業に時間がかかるなどの事情のため、調整会議の各分野 WG

(地質環境分野、工学技術分野、性能評価分野、直接処分分野)における全体計画の改訂作業を平成 26 年度末までを目途に終了し、分野別委員会等における有識者レビューは平成 27 年度に入ってから実施することとした。

上記の結果、平成 26 年度は全体計画(平成 25 年度～29 年度)の中間評価に係る検討委員会は開催せず、平成 27 年度に親委員会及び 4 つの分野別委員会(地質環境、工学技術、性能評価、直接処分)からなる検討委員会を改めて設置し、中間評価及びその後の全体計画の改訂を行うこととなった。

その他、全体計画の中間評価・見直しに資する海外文献の翻訳を行った。

参考資料

- [1] 資源エネルギー庁, (独) 日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2006 (2009 改訂版)
- [2] 資源エネルギー庁, (独) 日本原子力研究開発機構, TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画, 2006 (2009 改訂版)
- [3] 資源エネルギー庁, (独) 日本原子力研究開発機構, 高レベル放射性廃棄物及び TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体計画, 2010
- [4] 地層処分基盤研究開発調整会議, 地層処分基盤研究開発に関する全体計画(平成 25 年度～29 年度), 2013
- [5] 地層処分基盤研究開発調整会議, 地層処分基盤研究開発に関する全体計画【研究開発マップ】(平成 25 年度～29 年度), 2014

別添資料 実施研究報告

研究報告 1

断層周辺の地下水流動特性および
物質移行特性に関する包括的研究

京都大学 大学院工学研究科

柏谷 公希

1. 研究の背景と目的

1.1 研究の背景

日本では、原子力発電により発生する使用済み核燃料を再処理し、ウランやプルトニウムを回収することで再度発電に利用可能な核燃料とする核燃料サイクルに関する研究開発が進められている。核燃料サイクルで発生する廃棄物は大きく高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物に分けることができ、前者は使用済み核燃料の再処理によって発生する廃液をガラス材料と熔融・固化したもので、それ以外の廃棄物である低レベル放射性廃棄物に比べて放射能が高い（長崎・中山，2011）。放射性核種の崩壊によりガラス固化体の放射能は徐々に低下するが、人体に悪影響を及ぼさないレベルとなるまでには非常に長い時間を要する（図 1）。そのため、高レベル放射性廃棄物と、超ウラン元素を含む TRU 廃棄物のうち長寿命核種を含むものは、「地層処分」として 300m 以深に埋設し処分することが計画されている（長崎・中山，2011）。地層処分を行う目的は、「高レベル放射性廃棄物および地層処分（相当の）低レベル放射性廃棄物を長期間にわたり生活環境から十分に離れた安定な地下深部に埋設し、また、廃棄物に含まれる放射性物質を閉鎖後の長期間にわたり閉じ込めること」（原子力発電環境整備機構，2011）である。そのために、高レベル放射性廃棄物は地下深部に、ガラス固化体、金属製のオーバーパック、ベントナイトといった人工バリアと、処分サイトを構成する岩盤である天然バリアからなる多重バリアを用いて処分される。

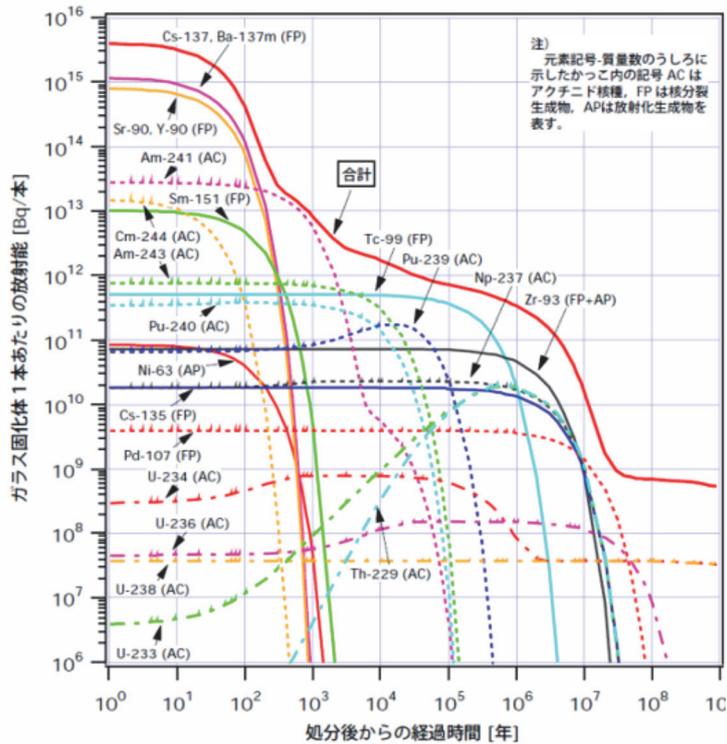


図1 ガラス固化体の放射能の経時変化（核燃料サイクル開発機構，1999a）

地層処分システムの安全性を担保するためには、処分実施後長期間にわたり、埋設された放射性廃棄物が生物圏を含む周辺環境にどのような影響を及ぼすのかを把握することが必要となる。高レベル放射性廃棄物処分の安全評価では、地層処分された放射性廃棄物が生物圏に悪影響を及ぼすプロセスとして、主に地下水シナリオと接近シナリオが考慮される（図2，核燃料サイクル開発機構，1999b）。地下水シナリオは、埋設された放射性廃棄物に含まれる放射性核種が地下水の作用によって移行し、人間環境に影響を及ぼすとするシナリオである。一方で、接近シナリオは、マグマの貫入や処分場への人間の侵入などにより、廃棄物と人間の物理的な距離が近づくことで悪影響を及ぼすとするシナリオである。日本における地層処分技術の信頼性について検討した「第2次とりまとめ報告書」（核燃料サイクル開発機構，1999b）では、地下水シナリオに基づく安全評価のため、図3のような移行経路を仮定したモデルを用いた核種移行解析を行っている。その中で、天然バリア（岩盤）中の核種移行については、処分場から漏出した核種が母岩中を100m移行した後、高透水性の大規模な破砕帯を伴う断層を800m上向きに流れて浅部の帯水層に到達すると仮定した（核燃料サイクル開発機構，1999b）。本モデルにおいて、母岩は1次元平行平板モデルの重ね合わせにより、断層破砕帯は1次元平行平板モデルによりそれぞれ表現され、評価を保守的なものとするため、断層内部の不均質性や核種移行における断層粘土や亀裂

充填鉱物による遅延効果は考慮していない。

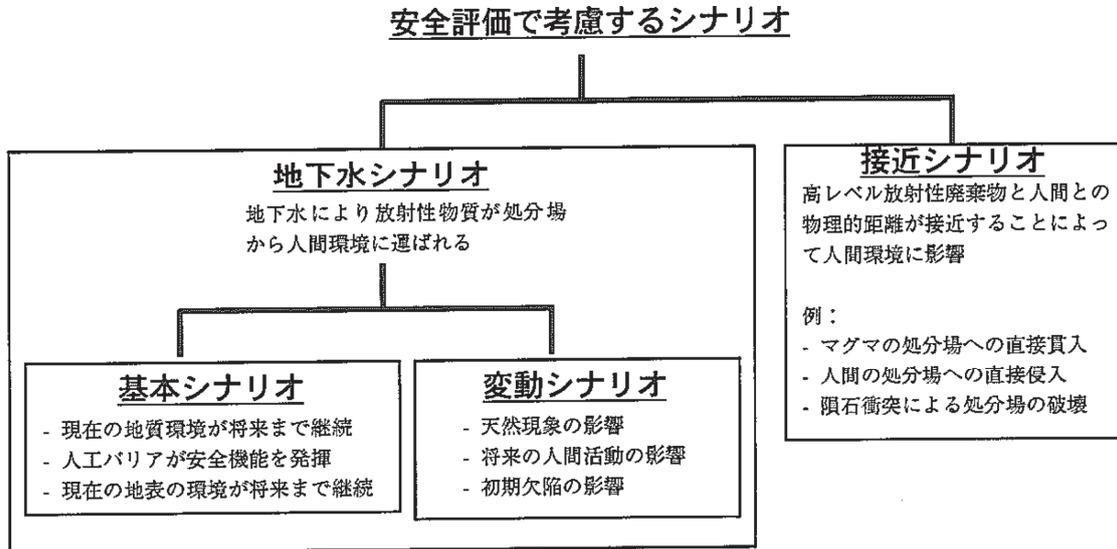


図2 地層処分の安全評価で考慮されるシナリオ
(核燃料サイクル開発機構, 1999b)

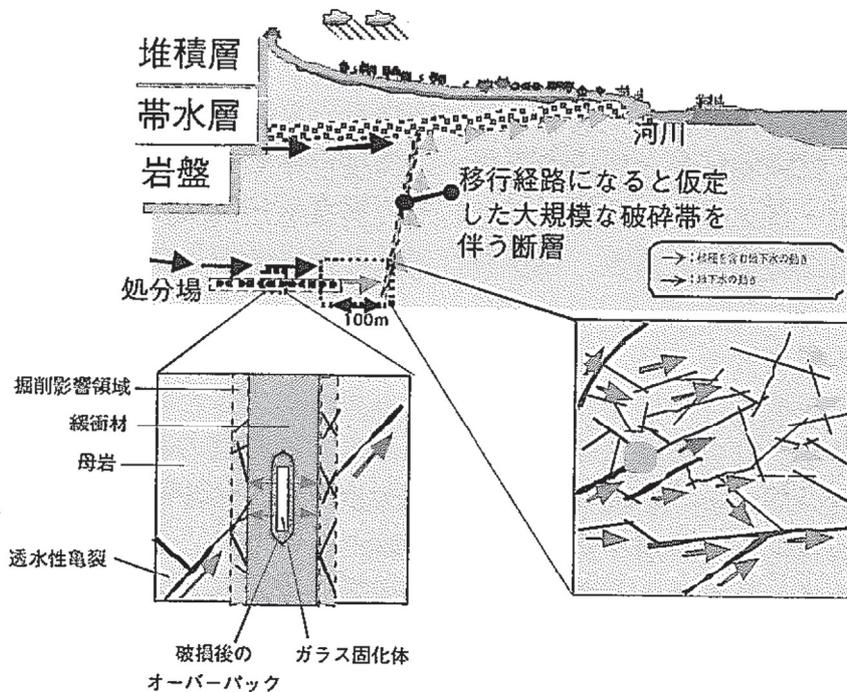


図3 第2次とりまとめの地下水シナリオで考慮された核種移行経路
(核燃料サイクル開発機構, 1999b)

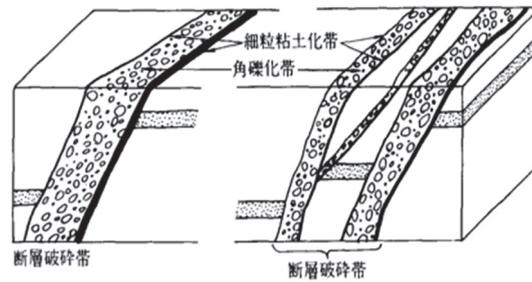


図4 断層の内部構造 (田中・井上, 1995)

断層は、「その両側で変位の認められる割れ目もしくは割れ目ゾーンであり、一般に破碎帯を伴うことが多い」と定義され、破碎帯を構成する破碎物質はその粒径に応じて細粒なものは断層ガウジ、粗粒なものは断層角礫と呼ばれる(田中・井上, 1995)。一般に破碎帯は割れ目が発達していることで、母岩と比較して高い透水性を示すことが多いが、主に断層ガウジからなる細粒粘土化帯(図4)は、透水性が低く遮水構造として機能し、周辺の地下水流動を規制することが知られている(田中・井上, 1995)。以上より、断層はその内部構造に応じて地下水流動や物質移行における経路(パス)あるいは障壁(バリア)としての機能、またはパスとバリア両方の機能を有するといえる。断層の内部構造や不均質性を踏まえて、断層破碎帯が周辺の地下水流動や物質移行をどのように規制するかを明らかにすることで、より実現象に即した核種移行解析が可能となり、地層処分の安全評価における地下水シナリオの評価をより信頼性が高いものとする上で貢献すると考えられる。

1.2 研究の目的

上述のような背景を踏まえ本研究では、モデルサイトとして日本国内に分布する断層を選定し、断層周辺の地下水流動および物質移行における断層のパス、バリアとしての機能を明らかにすることを目的とする。さらに、断層周辺の地下水流動および物質移行における断層のパス、バリアとしての機能を評価するための手法を構築することを目的とする。

大まかな研究の大まかな流れとしては、まずは文献調査を行い、本研究を進めるのに必要な条件を満たす断層を選定する。研究対象とする断層が選定されたら、その断層周辺における地下水の水理ポテンシャル、物理化学特性、岩盤の浸透率、鉱物組成、化学組成などの空間分布を推定する。断層の破碎構造や断層の内部構造の不均質性なども考慮して断層周辺の水理地質モデルと反応輸送モデルを作成し、地下水流動と物質移行に関するシミュレーションを行う。これと平行して、断層周辺で地下水試料を採取し、環境トレーサー分析を行う。実サンプルの分析結果から推定された環境トレーサーの濃度や同位体比の空間分布と、シミュレーションで推定された空間分布とを比較することで、シミュレーショ

ン結果を検証する。以上を通して断層周辺の地下水流動状態と物質移行状態が明らかとなる。また、地下水流動状態と物質移行状態を定量的に評価可能な断層周辺の水理地質モデルと反応輸送モデルを構築し、その妥当性を検証する一連の手法が確立、実証される。

平成 26 年度は、日本国内に分布する断層を対象に文献調査を行い、本研究を実施するために必要となる、1)断層角礫と断層ガウジを伴う、2)断層周辺の水文特性、水理特性に加え、地下水の水質や物理化学特性、地質構造、岩石の鉱物組成、化学組成、破碎構造などに関するデータが蓄積されている、3)露頭やコア試料で断層の観察、各種測定やサンプリングが可能である、といった条件を満たす断層を明らかにし、研究対象とする断層を選定した。また、近年大気、海水、陸水の循環状態を明らかにするための環境トレーサーとして分析される機会が増えており、本研究では断層周辺の地下水流動状態を把握し、シミュレーション結果の検証を行う上で有効な指標物質となりうることで期待される六フッ化硫黄を分析するための前処理装置を作製した。

2. 研究対象とする断層の選定

本研究では、断層周辺の地下水流動および物質移行における断層のパス、バリアとしての機能を明らかにするため、水理地質モデルと反応輸送モデルを作成し、地下水流動シミュレーションと物質移行シミュレーションを実施する。妥当性の高い水理地質モデルと反応輸送モデルを作成するために、まずは断層周辺の水文、水理、地質、地化学などに関する特性の空間分布を把握する必要がある。特に、断層周辺の地下水の水理ポテンシャル、物理化学特性、地化学特性や、岩石の浸透率、鉱物組成、化学組成、破碎構造などに関するデータが重要となる。本研究で研究対象とする断層に求められる条件として、断層角礫と断層ガウジを伴い、断層周辺の地下水流動や物質移行を規制する構造と考えられること、密な時間的、空間的間隔で断層周辺の水文、水理、地質、地化学に関するデータが取得されており、これらのデータが公開され利用可能であること、また、データ取得地点も明らかとなっていること、露頭やコア試料で断層の観察、各種測定やサンプリングが可能であること、などがあげられる。そこでまずは文献調査を行うことで、日本国内に分布する断層のうち上述の条件を満たす断層を把握した。これまで総合的な調査研究が行われ、これらの条件を満たす断層は限られることが明らかとなった。以下に各断層の概要についてまとめる。

2.1 月吉断層、主立坑断層

月吉断層および主立坑断層は、日本原子力研究開発機構（JAEA）の瑞浪超深地層研究所（岐阜県瑞浪市）周辺に分布する断層である（図 5）。研究所周辺の地質基盤は白亜紀後期

に形成した土岐花崗岩であり，その上に中新統の瑞浪層群，鮮新統の瀬戸層群と第四系が分布する（糸魚川，1974）。

月吉断層（図 5）は研究所の北側に位置しており，ほぼ EW 走向で，傾斜 70° S，見かけ累積変位が約 30m の逆断層である（窪島，2013）。正馬様用地（図 5 における Shobasama Site）から掘削されたボーリング孔（MIU-2 号孔，MIU-3 号孔，MIU-4 号孔）は土岐花崗岩中の月吉断層を貫いており，MIU-2 号孔では深度 890～915m に，MIU-3 号孔では深度 693～719m に，MIU-4 号孔では掘削長 669～孔底の 685m に月吉断層の破碎帯が観察された（石川ほか，1999；豊蔵ほか，2000；栗原ほか，2001）。MIU-3 号孔の断層コアはウルトラカタクレーサイト，カタクレーサイト，プロトカタクレーサイトであり，破碎した岩片が一定方向に配列する破碎流動組織や，緑色鉱物の配列が認められる面構造の発達が報告されている（窪島，2013）。水理特性としては，上述の月吉断層を貫くボーリング孔で実施された水理試験で，月吉断層下盤の地下水が被圧していることが明らかとなっており，断層下盤で 10^{-7} ～ 10^{-6} m/s オーダーの比較的大きな透水係数が得られている（図 6，石川ほか，1999；豊蔵ほか，2000）。そのため，月吉断層は断層面に垂直な方向には低透水性で，断層面に平行な方向には高透水性である透水異方性を示すと考えられている（例えば，毛屋・竹内，2009）。

主立坑断層は，瑞浪超深地層研究所（図 5 における MIU Construction Site）周辺に分布し，NW-SE 走向で鉛直に近い傾斜を示す断層系の一部であり，走向は $N30-40^{\circ}$ W で 80° W-鉛直傾斜である（窪島，2013）。超深地層研究所の立坑は主立坑断層とその周辺の変質帯中に掘削されており（図 7 および図 8），地質構造に関する詳細なデータが蓄積されていることに加え（例えば，川本ほか，2012），密な空間配置で様々な項目の調査，モニタリングが継続されている。深度 300m ステージから掘削されたボーリング孔（10MI22 号孔）は掘削長 76-111m で主立坑断層を貫いており（図 8），本孔で採取された断層コアは断層ガウジ，断層角礫，プロトカタクレーサイトである（窪島，2013）。水理試験における水圧応答や，周辺の研究坑道掘削に対する水圧や水質の応答が主立坑断層を境に異なることから，本断層は遮水構造であると考えられていた（三枝ほか，2007；竹内ほか，2010；鶴田ほか，2012）。上述の 10MI22 号孔で実施された揚水試験でも，主立坑断層の北東側と南西側に位置する観測井で揚水に対する圧力応答が異なることが明らかとなり，研究所周辺に分布する複数の遮水性断層に囲まれた領域が水理的なコンパートメントとなっている可能性が指摘されている（図 9 および図 10，大丸ほか，2012）。

上述のように，瑞浪超深地層研究所の研究坑道は主立坑断層と主立坑断層に伴う変質帯の中に位置しており，研究坑道から断層周辺部を対象とした各種原位置計測や試料採取が可能である。また，研究坑道内や研究用地周辺には多くのボーリング孔が存在し，本研究

で実施予定の環境トレーサー分析を行うための地下水試料も採取できる。さらに、これまで得られた水文・水理、地質、地化学などに関する調査結果はコンパイルされ、一部生データも含めて公開されており、その利用が可能である。

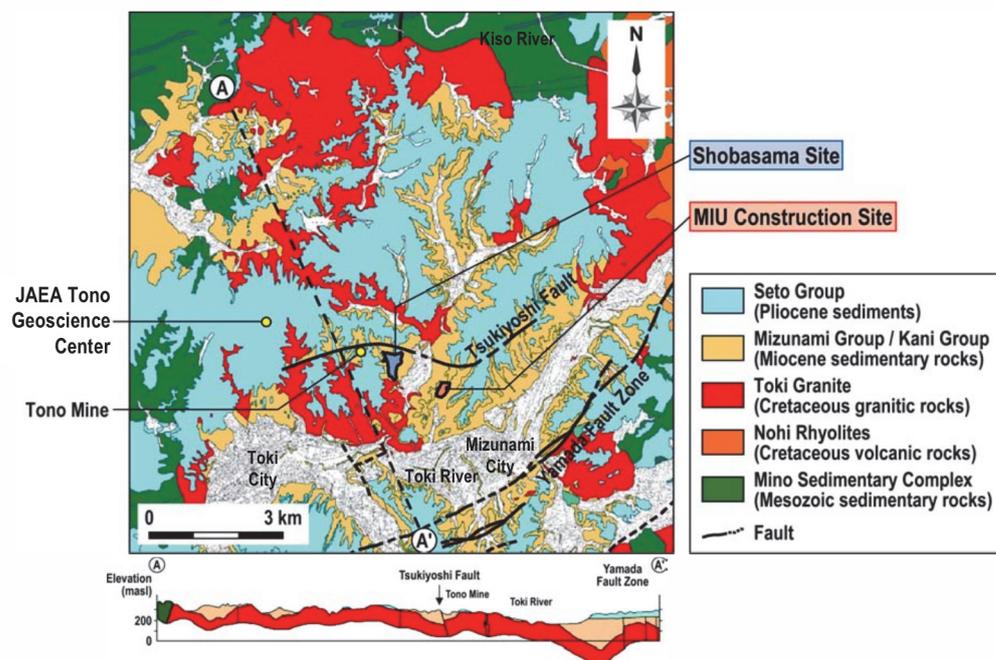


図 5 日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所周辺の地質図
(糸魚川 (1980) を簡略化, 三枝ほか (2007))

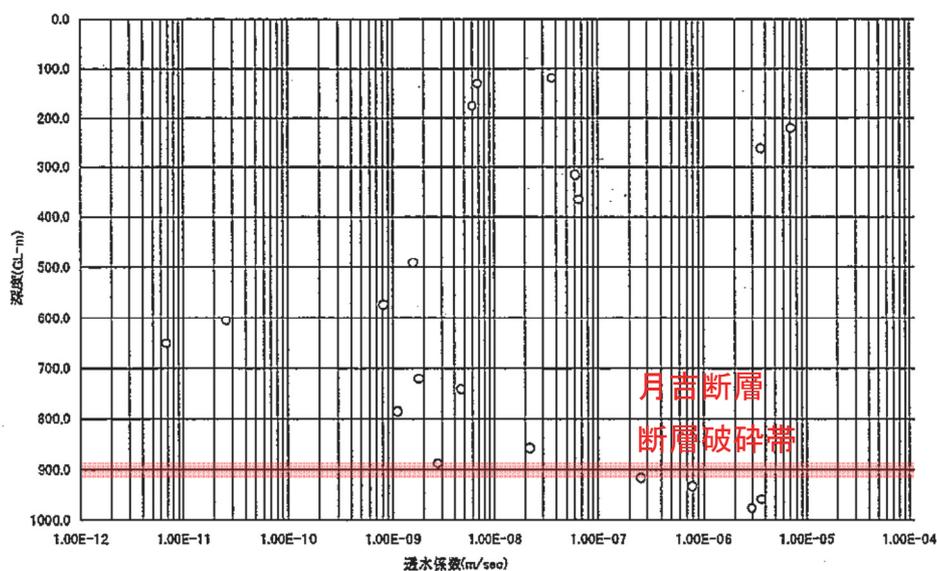


図 6 MIU-2 号孔における深度と透水係数の関係
(石川ほか (1999) を修正)

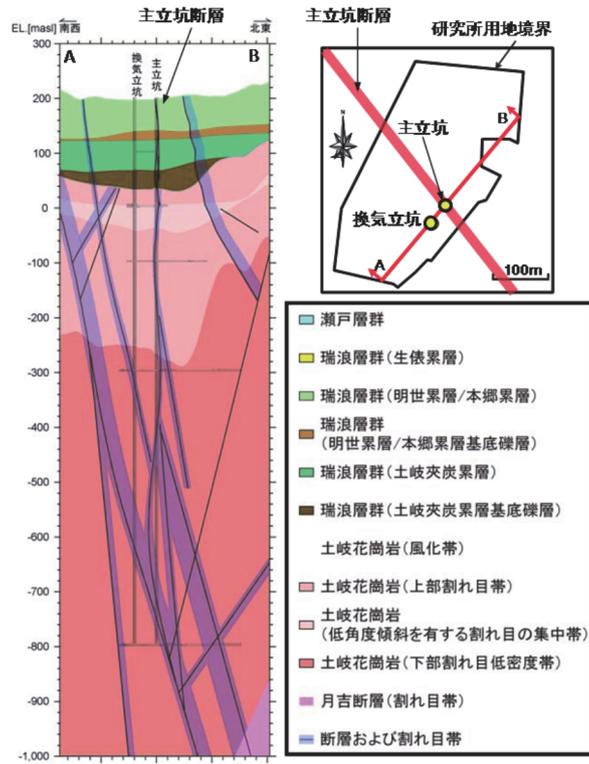


図 7 瑞浪超深地層研究所立坑周辺の地質断面図
(大丸ほか, 2012)

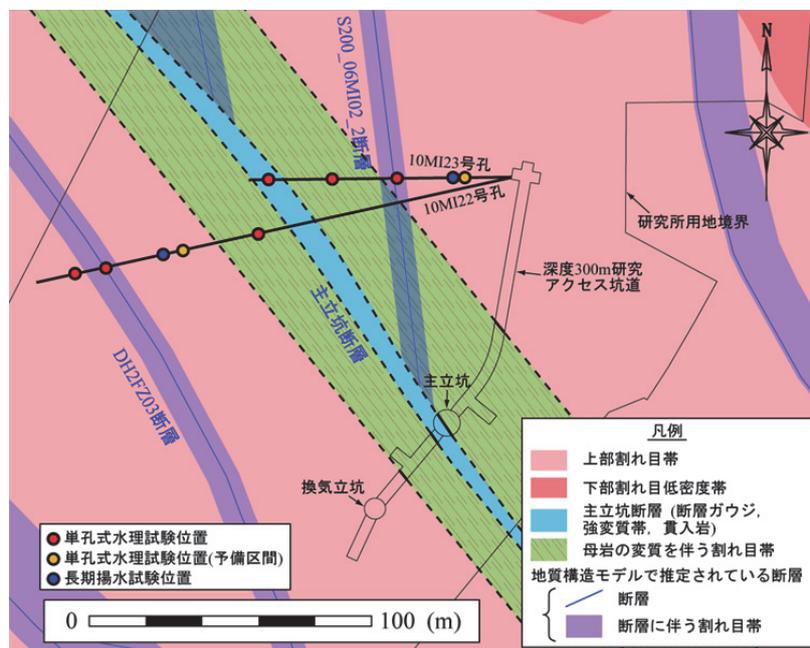


図 8 瑞浪超深地層研究所立坑周辺の深度 300m 断面における地質平面図
(鶴田ほか, 2012)

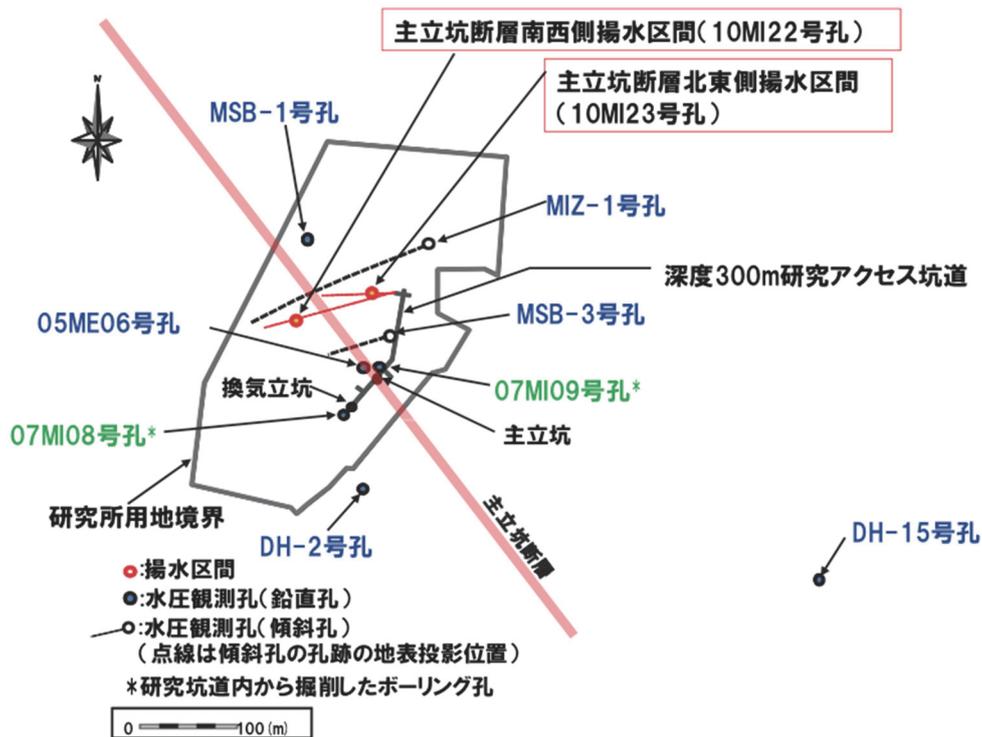


図9 瑞浪超深地層研究所周辺における主立坑断層と観測井の位置関係
(大丸ほか, 2012)

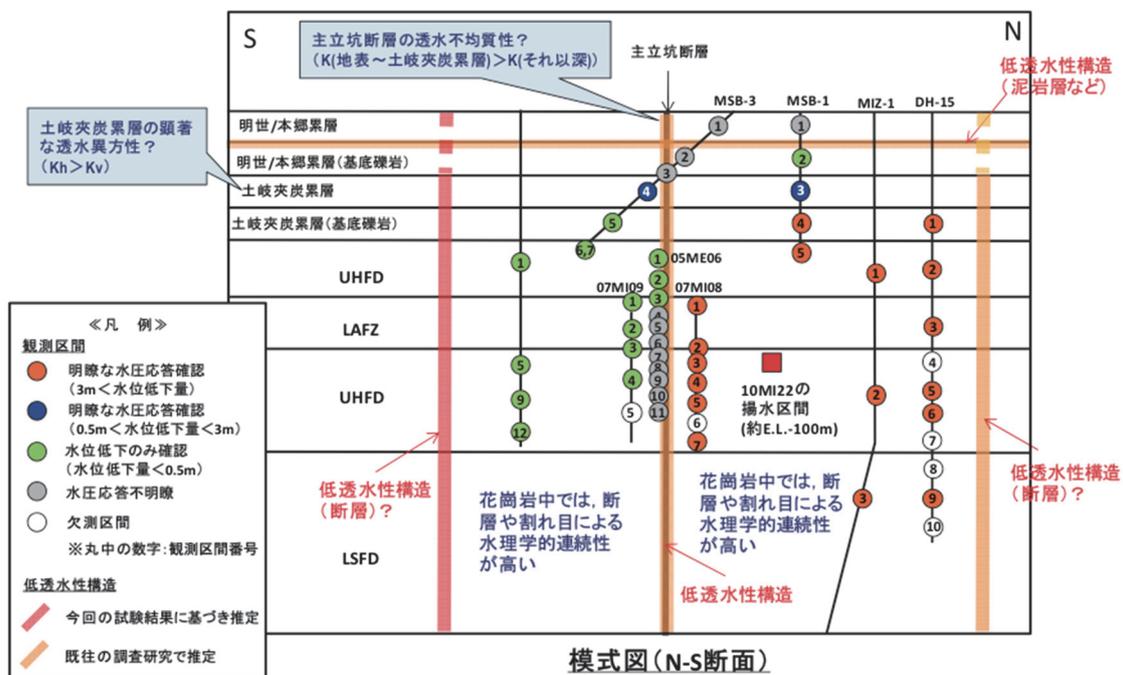


図10 10MI22号孔で実施した揚水試験に対する各観測井での水圧応答
(大丸ほか, 2012)

2.2 跡津川断層系

跡津川断層系は飛騨山地の北部に位置し、右横ずれを示す長さ 60～70km の活断層系であり、並行に東北東-西南西方向にのびる跡津川断層、茂住・祐延断層、牛首断層などからなる(竹内, 1998)。跡津川断層では断層面のクリープ(1～1.5mm/年)の可能性が指摘されており(多田, 1998)、活火山である弥陀ヶ原火山と白山火山の間に分布すること、断層沿いに微小地震が発生することが特徴とされている(竹内・丹保, 2008)。竹内・丹保(2008)で紹介されているように、跡津川断層系では古くから地形、地質構造や活動性に関する研究が行われてきた。例えば、断層構造(宮腰ほか, 1984; 跡津川断層トレンチ発掘調査団ほか, 1989; ハスバートルほか, 2001; 丹羽ほか, 2008; 道家・竹内, 2008)、断層構成物質とその空間分布(金折ほか, 1982a; 金折ほか, 1982b; Isaacs et al., 2008; 丹羽ほか, 2008; 鏡味・渡辺, 2009; Niwa et al., 2011; Oohashi et al., 2012)、微視的スケールにおける破碎構造(金折ほか, 1988; Kanaori et al., 1991; Niwa et al., 2011)、地震活動履歴(Takeuchi et al., 2003)、物理探査による構造推定(Mamada et al., 2002, 2004)などの報告がある。また、茂住祐延断層を対象に、「陸域地下構造フロンティア研究」の一環として活断層調査のための地下坑道が掘削され、坑道が貫通する破碎帯などを中心に総合的な調査研究が行われた(伊藤ほか, 1998)。安藤・活断層研究チーム(2000)によってまとめられている通り、坑道内では、断層岩組織の観察や化学組成、鉱物組成の観察、トラップ波の観測による断層破碎帯の深部構造推定、比抵抗、弾性波速度、岩盤のひずみ、間隙水圧などの連続観測に加え、地下水の地化学特性に着目した地下水流動に関する検討も行われた。その結果、地下水の水質が断層からの距離に応じて変化し、Na/Ca 比が断層帯で高くなることが明らかとなった(Satake et al., 2003)。また、地下水のトリチウムや酸素同位体の分析結果は、2つの破碎帯で透水性が異なることを示唆し、断層の活動性の違いを反映しているものと解釈された(Satake et al., 2003)。Forster et al. (2003)は、拘束圧条件下で岩石試料の浸透率測定を行うとともに、地下水のフロンガス分析で推定された見かけ滞留時間から浸透率を算出した。浸透率は 10^{-19} ～ 10^{-13} m²の範囲で、最大値、最小値はどちらも断層帯で測定された。その結果、茂住・祐延断層は断層に沿った方向には浸透率が高く、断層に垂直な方向には浸透率が低い Conduit-barrier system であるとした。Nohara et al. (2006)は本調査坑道において水理試験を行い、ほぼ垂直に分布する断層とほぼ水平な堆積構造を示す低浸透率の頁岩が調査坑道北西側への表流水の涵養を妨げていること、断層に沿うあまり粘土を含まない破碎部が、地下水の流動経路となっていることを指摘している。

2.3 野島断層

野島断層は淡路島の北西岸に分布する長さ 9km の右横ずれ断層(高角逆断層成分を伴う)で、NE-SW 走向、地表付近での傾斜は 75-85° S である(水野ほか, 1990; 牧本ほか, 1995; 栗田・水野, 1998)。1995 年 1 月 17 日に明石海峡付近の深さ 16.0km を震源として発生した地震(平成 7 年(1995 年)兵庫県南部地震)により、本断層に沿う地震断層が生じた(栗田・水野, 1998)。周辺の地質は、白亜紀の花崗岩を基盤とし、中新世の神戸層群、鮮新世～更新世の大阪層群、更新世～完新世の段丘堆積物、完新世の海岸平野堆積物、谷底平野堆積物などから構成される(栗田・水野, 1998)。活断層の構造、断層周辺の応力・温度分布、活動後の活断層における破砕帯の回復過程を明らかにする目的で、野島断層を貫くボーリングが数本掘削されている(安藤ほか, 1998)。これらボーリング孔を用いた原位置試験、モニタリングや、岩石コアを用いた多岐にわたる計測、分析が実施されており、それらの成果を中心に、断層の水理特性に関する研究を以下に示す。

Kiguchi et al. (2001)は野島断層の浸透率を推定する目的で、ハイドロフォン VSP を用いた調査をボーリング孔で実施した。断層ガウジを伴う断層帯に対応する深度が透水部である結果となり、断層ガウジの浸透率として約 $2 \times 10^{-12} \text{m}^2$ が得られた。Tadokoro et al. (2001)は注水実験に伴い発生する地震を観測し、注入した水が断層帯に沿って面状に流れると仮定して浸透率を算出することで、 10^{-14} - 10^{-15}m^2 の浸透率を得た。Tanaka et al. (2001)は岩石コア試料の観察に基づき、地震と地震の間の期間(interseismic period)と地震発生時および地震発生後の期間(co/post-seismic period)における断層周辺の流体挙動の概念モデルを作成した。Interseismic period では、地表から供給される酸化的な流体は断層ガウジの働きで断層下盤に流入せず、上盤のみで岩石の酸化と溶解が生じるのに対して、Co/post-seismic period では断層ガウジのバリアが破壊することで、酸化的な流体が下盤にも流入するとした。Fujimoto et al. (2007)は、炭酸塩鉱物の炭素同位体比と酸素同位体比の特性が断層を境界に異なり、断層が水理的なバリアとして働いていることを示した。Kitagawa et al. (2007)は、ボーリング孔で 3 年ごとに実施された注水試験において、時間経過とともに浸透率が低下したことを明らかにした。その原因として、地震の発生に伴い形成された亀裂が、その後の回復過程で閉塞したためと解釈した。Mizoguchi et al. (2008)は、地表の野島断層露頭から採取した岩石試料の浸透率測定を行った。拘束圧 180MPa を載荷した状態で断層ガウジの浸透率は 10^{-20} - 10^{-19}m^2 、断層角礫と破砕した母岩の浸透率は 10^{-18} - 10^{-14}m^2 であり、断層ガウジとその周辺のダメージゾーンがそれぞれ流体のバリアとパスとして働くことを明らかにした。

2.4 研究対象とする断層の選定

主立坑断層と月吉断層の周辺では、JAEA 瑞浪超深地層研究所を中心に様々な項目の調査、モニタリングが行われており、本研究で必要となる断層周辺の水文、水理、地質、地化学などに関するデータが蓄積、公開されている。また、主立坑断層の直近に研究坑道が位置しており、断層の観察、原位置計測、サンプリングが可能である。さらに、広域的な地質構造や地下水流動状態に関するデータも得られており、断層周辺のサイトスケールで解析を実施する上で境界条件を設定しやすい。以上を考慮し、主に主立坑断層を対象に、月吉断層を比較対象として研究を実施することとした。

3. 六フッ化硫黄分析前処理装置の作製

3.1 背景と目的

六フッ化硫黄 (SF_6) は、無色、無臭で、無毒性、不燃性といった性質を示す化合物である (Busenberg and Plummer, 2000)。1953 年にアメリカで産業的な合成が始まり (Maiss and Brenninkmeijer, 1998)、主に電気設備の絶縁体として利用されている (Ko et al., 1993)。六フッ化硫黄の大気中における滞留時間は 3200 年 (Ravishankara et al., 1993) と考えられていることからわかるように、非常に化学的安定性が高い化合物である。図 11 に、アメリカ地質調査所 Groundwater Dating Laboratory によって公開されている大気中の SF_6 とフロンガス (CFC-12, CFC-11, CFC-113) の濃度変化を示す。フロンガスはオゾン層の破壊や地球温暖化の原因となることから、モントリオール議定書によりその製造、輸送、消費が制限されている。その結果、1990 年代以降大気中の濃度が上昇から減少に転じた。 SF_6 も温室効果ガスとして知られているが、他の物質で代替することが困難なことから、現在も生産、使用が続けられており、フロンガスに比べるとその大気中濃度は低いものの急激な上昇を続けている。生産され、環境中に排出された SF_6 やフロンガスは大気、海水、陸水などとともに地球上を循環することから、それらの循環状態を把握するためのトレーサーとして用いられている (例えば, Kashiwaya et al., 2014)。

本研究では、断層周辺における水理地質モデルと反応輸送モデルを構築し、地下水流動状態と物質移行状態に関するシミュレーションを行う。また、地下水試料を採取して環境トレーサーの分析を行い、それらの濃度や同位体特性の空間分布を推定し、シミュレーションで計算される空間分布と比較することによりシミュレーション結果の妥当性を検証する。上述のように、その難分解性と、現在も大気中濃度が増大していることを考慮すると、 SF_6 はこのような検討に用いる環境トレーサーとして適していると考えられる。本年度は、

水試料に含まれる SF₆ の分析に使用する前処理装置を作製し、本装置を用いた分析手順を整理した。

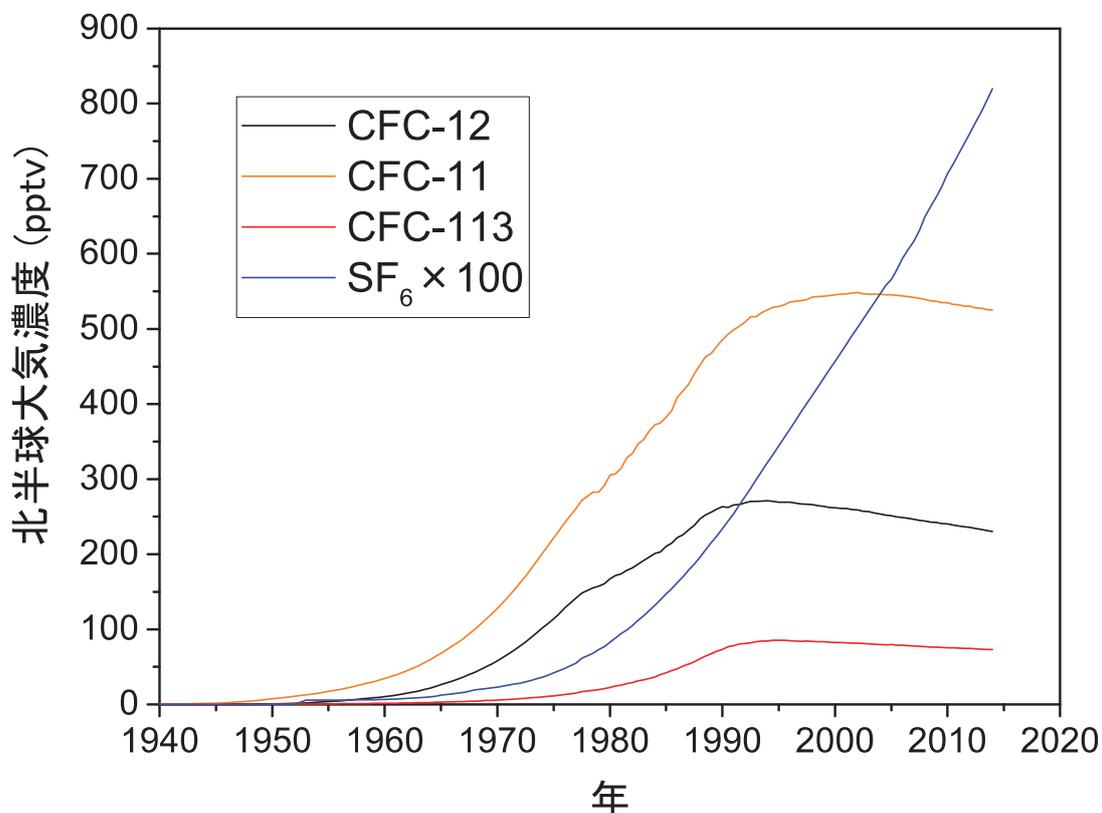


図 11 大気中のフロンガス (CFC-12, CFC-11, CFC-113) 濃度および SF₆ 濃度の推移
(The Reston Groundwater Dating Laboratory,
http://water.usgs.gov/lab/software/air_curve/)

3.2 SF₆ の分析原理および分析前処理装置の構成

水試料に含まれる SF₆ の濃度を求める場合、一般に Purge and trap GC-ECD 法が用いられる (Wanninkhof et al., 1991; Law et al., 1994; Busenberg and Plummer, 2000; 時枝ほか, 2007)。本手法で使用される装置は、大きく分けて試料から分析対象である SF₆ を追い出し (パージ)、捕集する (トラップ) 前処理部と、前処理部で捕集された SF₆ を検出するガスクロマトグラフからなる (時枝ほか, 2007)。前処理部では、水試料に窒素ガスなどを通気し、バブリングすることで水試料中の SF₆ を追い出し、エタノールおよびドライアイスなどにより冷却されたトラップで捕集する。トラップを加熱し、トラップの吸着剤により捕集された SF₆ を脱着させ、ガスクロマトグラフに導くことで分離、検出する。検出器には、ハロゲン化合物を含む親電子性物質に特異的な検出感度を有する電子捕獲型検出器

(Electron Capture Detector, ECD) を用いる。今回は Busenberg and Plummer(2000)の分析装置を参考に、一部改良を加えることで SF₆ 分析用前処理装置を作製した。装置の外観写真を図 12 に、模式図を図 13 に示す。本装置を用いた分析手順の概要を以下に示す。

3.3 分析手順

3.3.1 窒素ガスによるフラッシング

図 11 に示した通り大気には SF₆ が含まれており、大気が分析ラインやサンプルに混入することでコンタミが生じる。分析前に一定時間窒素ガスを流すことで、分析ライン中の SF₆ を除去する (図 14)。

3.3.2 標準ガスの分析による検量線の作成

V-1 に接続された標準ガス (SF₆ と窒素の混合ガスで、SF₆ 濃度 100 pptv) を V-2 のループに導入し、規定量の標準ガスを分取する (図 15)。ループ内の標準ガスを、エタノールおよびドライアイスで冷却したトラップ 2 に導入し、ガス中の SF₆ を捕集する (図 16)。V-4 を操作することでトラップ 2 をガス流路から切り離れた状態 (Close) にしてトラップ 2 をホットバスに浸漬し、吸着剤に吸着した SF₆ を脱着させる。再び V-4 を操作してトラップ 2 をキャリアガス流路と接続し (Open), SF₆ を含む窒素ガスをガスクロマトグラフに導入する。プレカラムとメインカラムにより分離された SF₆ が ECD により検出される (図 17)。クロマトグラムで SF₆ のピークが出現した後は、V-5 を操作し、プレカラムにおける窒素ガスの流動方向が逆転した状態 (Flush) とすることで、バックフラッシュを生じさせる。これにより、保持時間が長い化合物がメインカラムや ECD に入るのを防ぐことができる。V-2 のループを切り替えることで、同様の操作を 4 種類のガス容積 (0.1mL, 0.25mL, 0.5mL, 0.75mL (0.25mL+0.5mL)) で行い、クロマトグラムにおける SF₆ のピーク面積を求める。ループに導入された標準ガスの体積と濃度から SF₆ のモル数を算出し、クロマトグラムにおけるピーク面積との関係をプロットすることで検量線を作成する。



SF₆抽出部

SF₆濃縮部

検出部
(GC-ECD)

GC制御用
データ処理用
コンピュータ

図 12 SF₆分析装置の外観写真

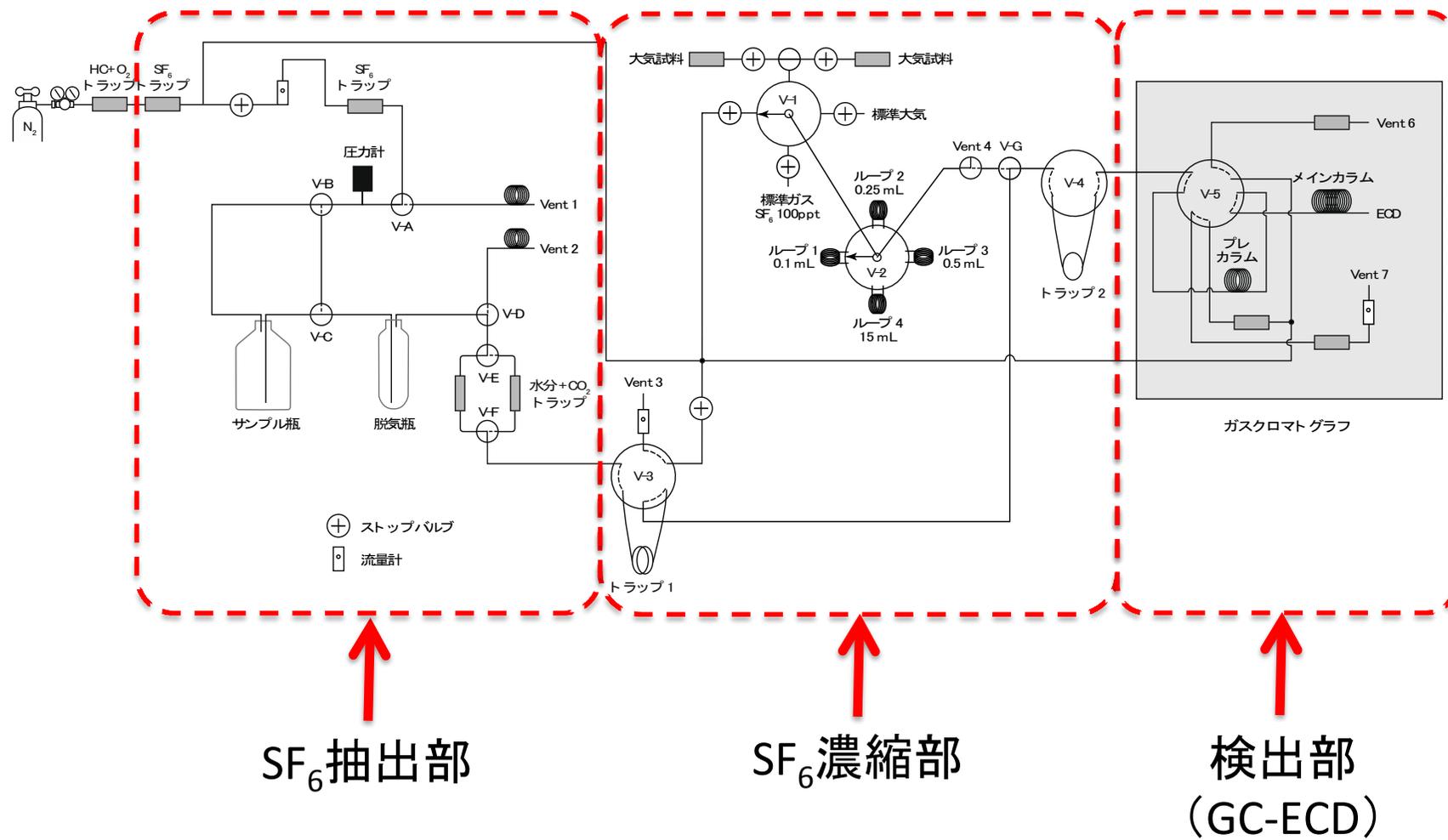


図 13 SF₆分析用前処理装置模式図

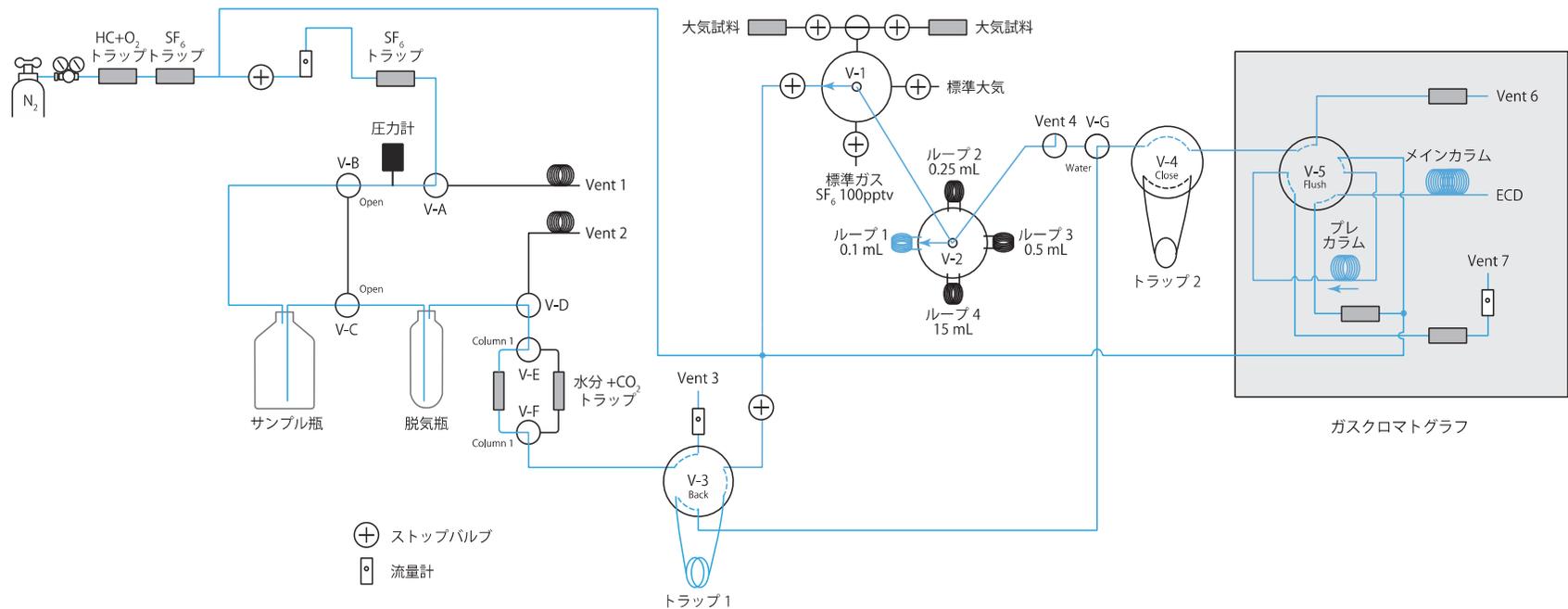


図 14 フラッシング時の装置状態

(青色の実線が超高純度窒素ガスの流動経路を示す。以下同様)

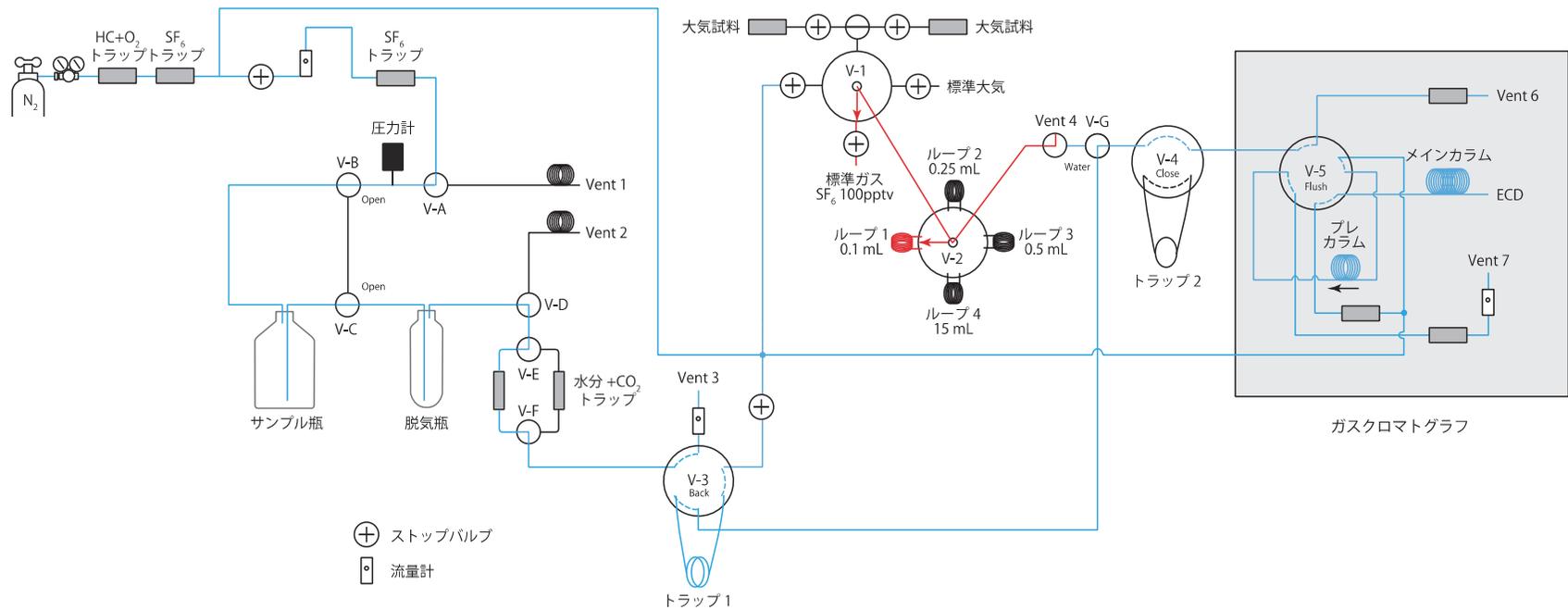


図 15 標準ガスループ導入時の装置状態

(標準ガスがループに導入され、規定の容積を分取する。赤色の実線が、SF₆を含むガスの流動経路を示す。)

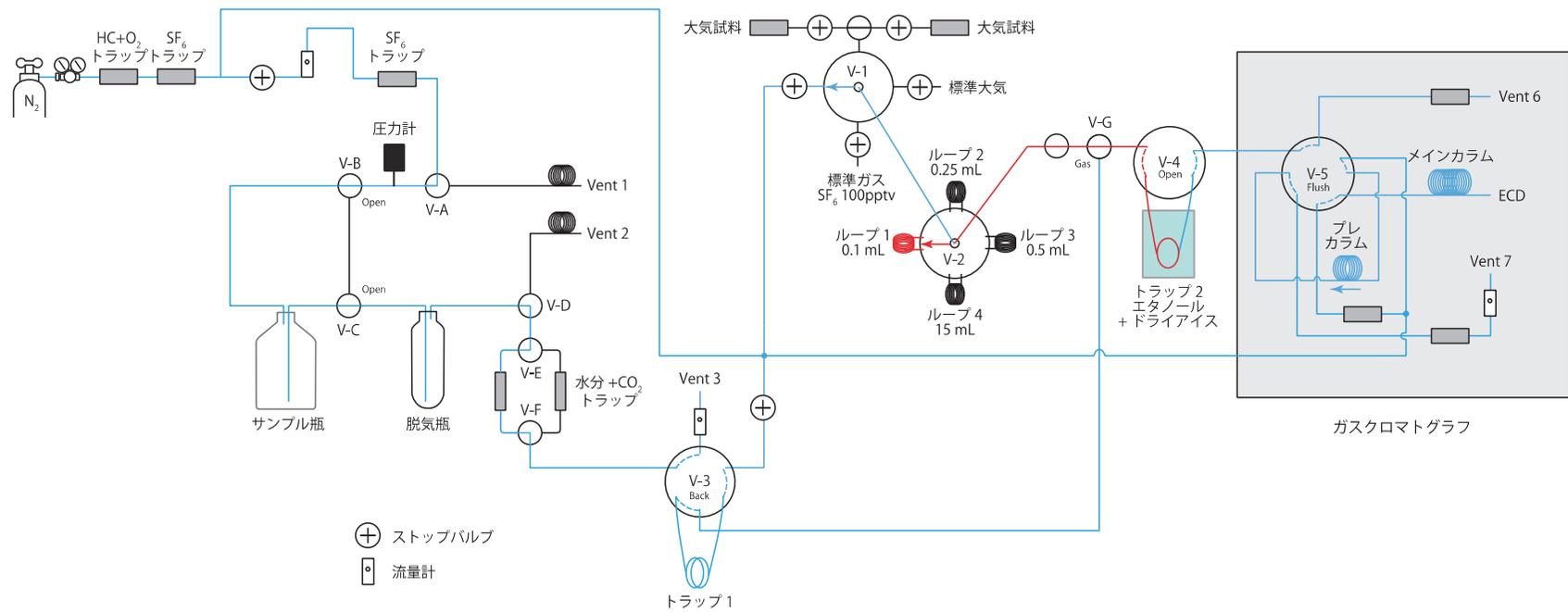


図 16 標準ガストラップ時装置状態

(ループの標準ガスがトラップ 2 に導入され、標準ガスに含まれる SF_6 がトラップに捕集される)

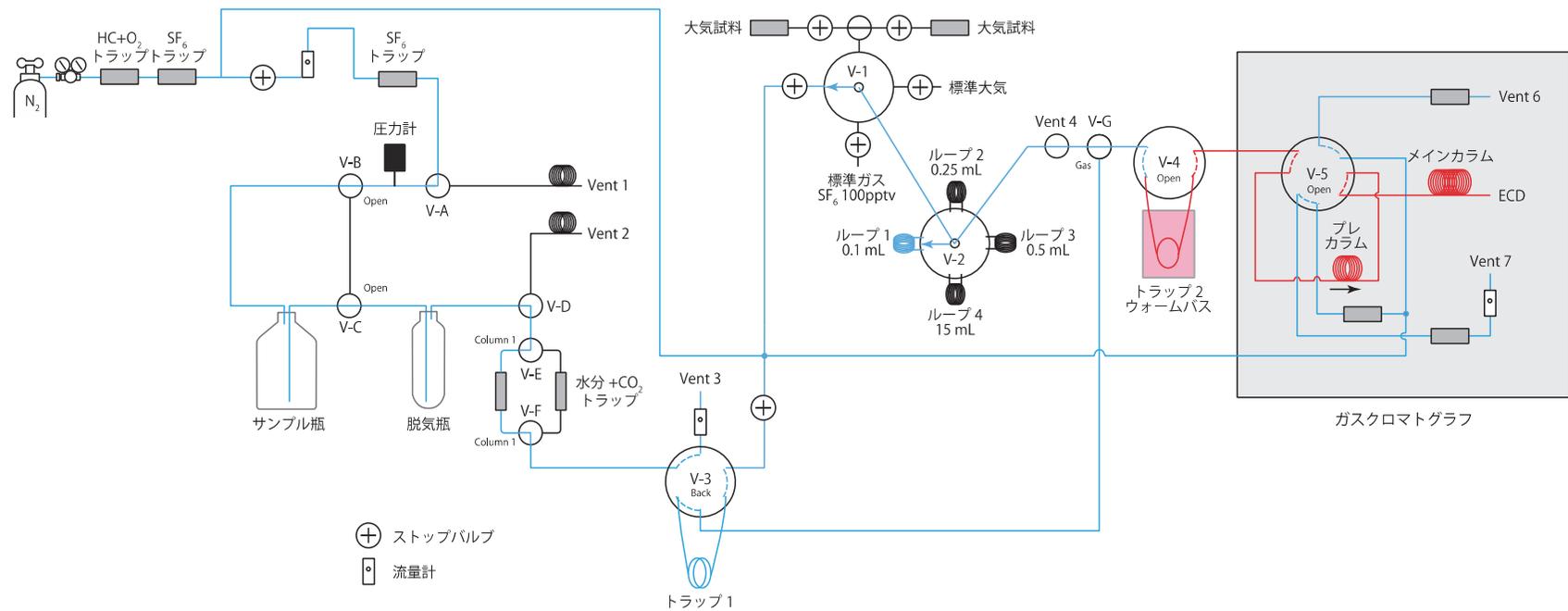


図 17 SF₆ 検出時装置状態

(トラップ 2 に捕集された SF₆ をガスクロマトグラフに導入し、プレカラム、メインカラムで分離した後 ECD 検出する。)

3.3.3 未知試料の分析

試料は 1L のメジューム瓶に採取する。分析前処理装置は GL45 規格のねじ口によりメジューム瓶を接続できる構造となっており、瓶内に超高純度窒素ガスを圧入し、内圧を上昇させることで試料を脱気瓶へと移す。脱気瓶に水試料が移った後、V-B と V-C を操作することでメジューム瓶に接続されたラインが切り離され (Close)、窒素ガスが脱気瓶に導入される。窒素ガスによるバブリングが生じることでサンプルに溶存する SF₆ が脱ガスし、エタノールとドライアイスで冷却したトラップ 1 によって捕集される (図 18)。トラップ 1 をホットバスに浸漬し、V-3 を Flush とすることで捕集された SF₆ がトラップ 2 へと導入される (図 19)。トラップ 2 はエタノール、ドライアイスで冷却されており、キャリアガスに含まれる SF₆ が吸着される。後は標準ガスの場合と同様に、トラップ 2 をホットバスに移すことで SF₆ を脱着させ、ガスクロマトグラフに導入することで SF₆ を検出する (図 20)。

クロマトグラムにおけるピーク面積を、標準ガスを用いて作成した検量線と比較し、未知試料に含まれる SF₆ のモル数を求める。脱気瓶に導入された試料の質量と、分析結果として得られた SF₆ のモル数より、未知試料における SF₆ の濃度が算出される。

3.2.4 SF₆ 大気濃度への換算および見かけ年代の推定

クロロフルオロカーボンの場合 (Plummer and Busenberg, 2000) と同様に、ヘンリーの法則に基づいて、分析で得られる水試料の SF₆ 濃度 (C) から、水試料が涵養時平衡状態にあった大気中の SF₆ 濃度 (p) を算出できる。なお、SF₆ のヘンリー定数 (K_H) は、Weiss (1970, 1974) の式 (3.2) と Bullister et al. (2002) によって求められた係数 (3.2 式の a~f, 表 1) から算出する。

$$\ln K_H = a + b \left(\frac{100}{T} \right) + c \ln \left(\frac{T}{100} \right) + S \left[d + e \left(\frac{T}{100} \right) + f \left(\frac{T}{100} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

ここで T は温度 (K)、 S は塩分濃度 (%) である。地下水の混合を考慮する必要がない場合 (ピストン流を仮定する場合)、算出された平衡大気における SF₆ 濃度を大気中の SF₆ 濃度の経時変化 (図 11) と比較することで、見かけの地下水涵養年を求めることができる。

表 1 Weiss (1970, 1974)の式 (3.2) で SF₆ のヘンリー一定数を算出するための係数 (Bullister et al. (2002))

	K_H	K_H
	mol/kg·atm	mol/L·atm
<i>a</i>	-82.1639	-80.0343
<i>b</i>	120.152	117.232
<i>c</i>	30.6372	29.5817
<i>d</i>	0.0293201	0.0335183
<i>e</i>	-0.0351974	-0.0373942
<i>f</i>	0.00740056	0.00774862

4. まとめおよび次年度の予定

本年度（平成 26 年度）は日本国内に分布する断層について文献調査を行い，本研究で求められる条件（断層ガウジと断層角礫を伴い，地下水流動や物質移行を規制する構造と考えられること，原位置における観察，各種計測や，岩石コア，地下水などのサンプリングが可能であること，断層周辺の水文，水理，地質，地化学などに関するデータが蓄積，公開されており，それらを用いた解析が可能であること）について検討した結果，本研究で研究対象とする断層として岐阜県東濃地域に分布する主立坑断層と月吉断層を選定した。断層に関する文献調査は今後も継続し，研究対象となりうる断層が見出された場合は上述の断層と平行して調査研究を実施する。できるだけ多くの断層を対象とすることで，地下水流動および物質移行における断層のパスおよびバリアとしての機能に関する一般性や各断層の特性が明らかとなるものと期待される。また，Purge and trap GC-ECD 法による SF₆ 分析で使用する分析前処理装置を作製し，分析手順を整理した。

平成 27 年度は，選定された主立坑断層と月吉断層周辺に分布する岩石の浸透率測定と，鉱物組成，化学組成の分析を行う。得られた浸透率，鉱物のモード値，元素濃度と，測定地点の座標，あるいは試料採取地点の座標に基づいて，これら特性の三次元的な空間分布を推定する。また，地下水の水理ポテンシャルについてもデータを収集し，空間分布を推定する。断層周辺の岩石の破碎構造を踏まえて水理地質モデルを作成し，地下水流動シミュレーションを実施する。また，本年度作製した SF₆ 分析前処理装置を用いた分析を開始する。まずは本装置で得られる分析値の精度と再現性の検証のため，同一試料の繰り返し分析や，他研究室の装置による分析結果とのクロスチェックなどにより，分析値の信頼性を検証する。

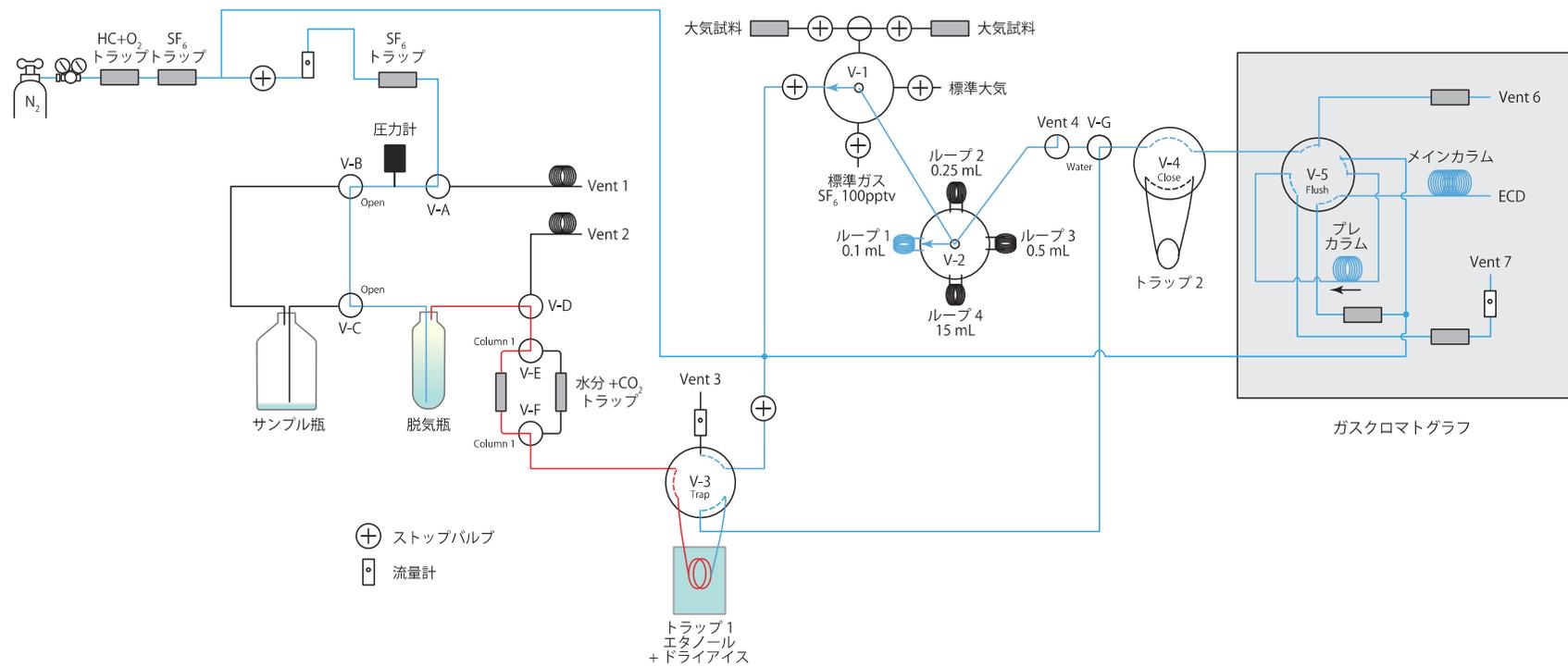


図 18 未知試料のバブリング時およびトラップ時の装置状態

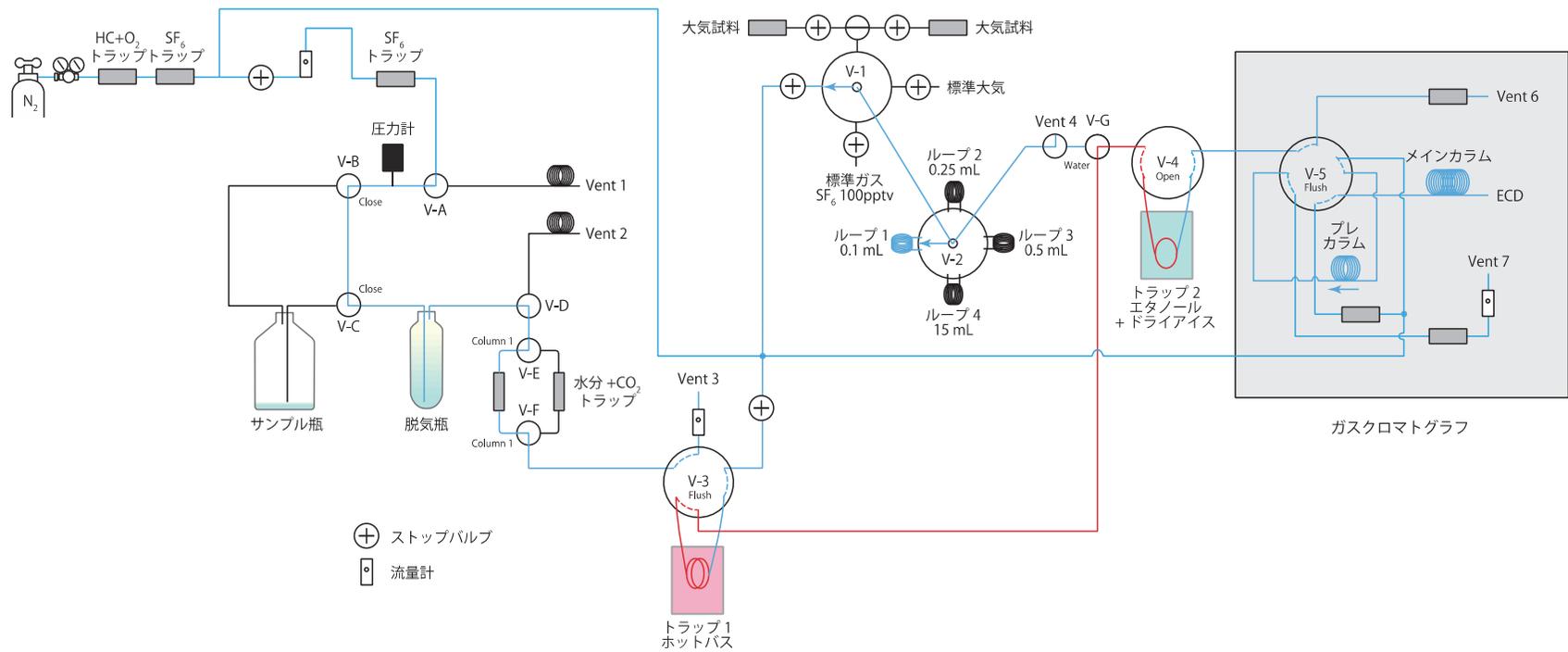


図 19 未知試料の分析におけるトラップ 1 からトラップ 2 への SF_6 の導入

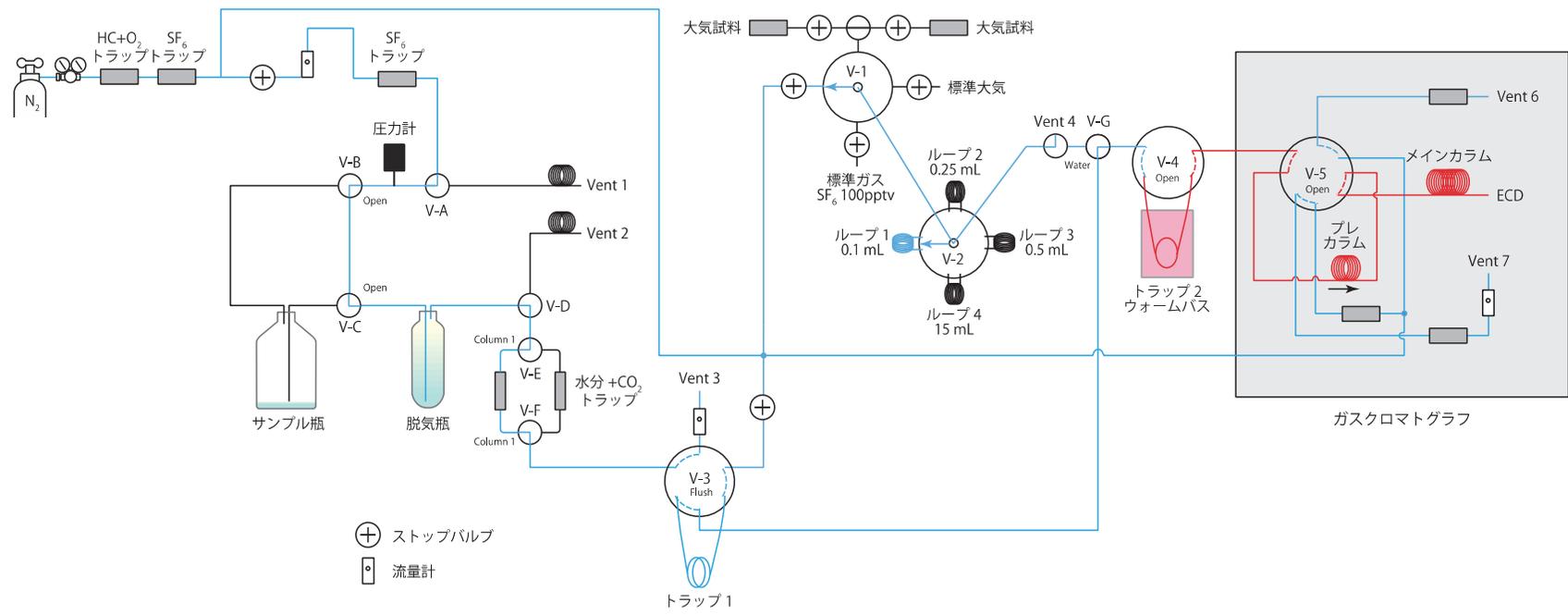


図 20 未知試料の分析における SF₆ 検出時の装置状態

引用文献

- 栗田泰夫, 水野清秀, 1998, 1 万分の 1 兵庫県南部地震に伴う地震断層ストリップマップ-野島・小倉及び灘川地震断層-説明書, 地質調査所.
- 跡津川断層トレンチ発掘調査団, 岡田篤正, 竹内章, 佃為成, 池田安隆, 渡辺満久, 平野信一, 升本真二, 竹花康夫, 奥村晃史, 神嶋(竹村)利夫, 小林武彦, 安藤雅孝, 1989, 岐阜県宮川村野首における跡津川断層のトレンチ発掘調査, 地学雑誌, 98, 62-85.
- 安藤雅孝, 島崎邦彦, 竹村恵二, 1998, 総論; 断層解剖計画, 月刊地球号外, 21, 5-12.
- 安藤雅孝, 活断層研究チーム, 2000, 跡津川断層帯での地殻活動研究, サイクル機構技報, 9, 131-141.
- 石川清, 目崎吉彦, 鈴木秀雄, 甲斐昌宣, 渡部倅, 藤盛誠二, 石川潤一, 1999, 正馬様用地における試錐調査 (MIU-2 号孔), JNC TJ7420 99-016.
- 糸魚川淳二, 1974, 瑞浪層群の地質, 瑞浪市化石博物館研究報告, 1, 9-42.
- 糸魚川淳二, 1980, 瑞浪層群の地質, 瑞浪市化石博物館専報, 1, 1-50.
- 伊藤谷生, 竹内章, 田中秀実, 西川有司, 迫垣内薫, 岡田洋一, 1998, 活断層地下観測場: 茂住祐延断層調査坑道 (速報), 月刊地球, 20, 182-187.
- 鏡味芳宏, 渡辺了, 2009, 弾性波速度測定に基づく跡津川断層周辺浅部地殻物質の推定, 地震, 99-111.
- 核燃料サイクル開発機構, 1999a, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- 核燃料サイクル開発機構, 1999b, わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-分冊 3 地層処分システムの安全評価, JNC TN1400 99-023.
- 金折裕司, 猪原芳樹, 宮腰勝義, 佐竹義典, 1982a, 跡津川断層に伴う断層内物質 (その 1), 応用地質, 23-3, 9-27.
- 金折裕司, 宮腰勝義, 猪原芳樹, 佐竹義典, 1982b, 跡津川断層に伴う断層内物質 (その 2) -粒度別鉱物組成および化学組成-, 応用地質, 23-4, 5-17.
- 金折裕司, 矢入憲二, 宮腰勝義, 1988, 跡津川断層北東部における花崗岩類の微小変形構造とその形成過程, 94, 887-901.
- 川本康司, 窪島光志, 石橋正祐紀, 鶴田忠彦, 笹尾英嗣, 池田幸喜, 見掛信一郎, 原郁夫, 山本勝, 2012, 超深地層研究所計画 瑞浪超深地層研究所 研究坑道の壁面調査データ集, JAEA-Data/Code 2012-009.
- 窪島光志, 2013, 瑞浪超深地層研究所用地およびその周辺に分布する断層の発達過程-断層岩の組織と鉱物組成からの検討-, 日本地質学会第 120 年学術大会講演要旨, R15-O-1.

窪島光志, 笹尾英嗣, 2012, 瑞浪超深地層研究所周辺に分布する断層の形成・発達過程, 日本地質学会第 119 年学術大会講演要旨, R12-O-7.

栗原正治, 山口昌司, 名取二郎, 濱野幸治, 丸山亮, 森林成生, 2001, 正馬様用地における試錐調査 (MIU-4 号孔), JNC TJ7440 2002-008.

毛屋博道, 竹内竜史, 2009, 広域地下水流動研究における地下水の間隙水圧長期モニタリング (2005 年度~2008 年度) データ集, JAEA-Data/Code 2009-031.

大丸修二, 尾上博則, 竹内竜史, 2012, 超深地層研究所計画 (岩盤の水理に関する調査研究) 主立坑断層を対象とした水理学的調査, JAEA-Research 2012-008.

豊蔵勇, 橋井智毅, 名越澄生, 伊藤孝, 杉森辰次, 杉田信隆, 政枝宏, 2000, 正馬様用地における試錐調査 (MIU-3 号孔), JNC TJ7440 2000-022.

原子力発電環境整備機構, 2011, 処分場の安全機能と技術要件, NUMO-TR-10-11.

三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工, 2007, 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第 1 段階) 研究成果報告書, JAEA-Research 2007-043.

竹内章, 1998, 跡津川断層と茂住祐延断層, 月刊地球, 20, 133-136.

竹内章, 丹保俊哉, 1998, 跡津川断層の地質的概要, 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書「1858 飛越地震」, 17-28.

竹内真司, 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 早野明, 竹内竜史, 三枝博光, 大山卓也, 水野崇, 平野享, 尾方伸久, 濱克宏, 池田幸喜, 山本勝, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造, 2010, 超深地層研究所計画年度報告書 (2008 年度), JAEA-Review 2010-014.

多田堯, 跡津川断層における地殻変動, 月刊地球, 20, 142-148.

田中和広, 井上大栄, 1995, 断層の定義, 考え方, 土と基礎, 43, 11-14.

鶴田忠彦, 武田匡樹, 上野孝志, 大丸修二, 徳安真吾, 尾上博則, 新宮信也, 石橋正祐紀, 竹内竜史, 松岡稔幸, 水野崇, 田上雅彦, 2012, 超深地層研究所計画主立坑断層を対象としたボーリング調査結果報告書, JAEA-Technology 2012-001.

時枝隆之, 石井雅男, 斉藤秀, 緑川貴, 2007, 大気および海水中の超微量六フッ化硫黄(SF₆)の測定手法の高度化と SF₆標準ガスの長期安定性の評価, 気象研究所技術報告, 51.

長崎晋也・中山真一編, 2011, 放射性廃棄物の工学, オーム社.

丹羽正和, 島田耕史, 黒澤英樹, 三輪敦志, 2008, 圧縮性ステップにおける破砕帯の構造-岐阜県飛騨市の跡津川断層西部の例-, 地質学雑誌, 114, 495-515.

ハスパートル, 安江健一, 竹内章, 那須忠利, 高見明, 2001, 跡津川断層中部で新たに確

- 認された断層露頭 (速報), 活断層研究, 20, 46-51.
- 牧本均, 利光誠一, 高橋浩, 水野清秀, 1995, 20 万分の 1 地質図「徳島」, 地質調査所.
- 水野清秀, 服部仁, 寒川旭, 高橋浩, 1990, 明石地域の地質 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所.
- 道家涼介, 竹内章, 2009, 岐阜県飛騨市神岡町佐古における断層露頭と跡津川断層東部の最新活動, 第四紀研究, 48, 11-17.
- 宮腰勝義, 猪原芳樹, 佐竹義典, 1984, 大規模断層の分布, 性状と活動性 (その 1) -跡津川断層の調査と解析-, 電力土木, 191, 9-19.
- Bullister, J.L., Wisegarver, D.P., Menzia, F.A., 2002. The solubility of sulfur hexafluoride in water and seawater. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 49, 175-187.
- Busenberg, E., Plummer, L.N., 2000. Dating young groundwater with sulfur hexafluoride: Natural and anthropogenic sources of sulfur hexafluoride. *Water Resour.Res.* 36, 3011-3030.
- Forster, C.B., Evans, J.P., Tanaka, H., Jeffreys, R., Nohara, T., 2003. Hydrologic properties and structure of the Mozumi Fault, central Japan. *Geophys.Res.Lett.* 30, MOZ 1-1 - 1-4.
- Fujimoto, K., Ueda, A., Ohtani, T., Takahashi, M., Ito, H., Tanaka, H., et al., 2007. Borehole water and hydrologic model around the Nojima fault, SW Japan. *Tectonophysics*. 443, 174-182.
- Isaacs, A.J., Evans, J.P., Kolesar, P.T., Nohara, T., 2008. Composition, microstructures, and petrophysics of the Mozumi fault, Japan: In situ analyses of fault zone properties and structure in sedimentary rocks from shallow crustal levels. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 113.
- Kanaori, Y., Yairi, K., Ishida, T., 1991. Grain boundary microcracking of granitic rocks from the northeastern region of the Atotsugawa fault, central Japan: SEM backscattered electron images. *Eng.Geol.* 30, 221-235.
- Kashiwaya, K., Hasegawa, T., Nakata, K., Tomioka, Y., Mizuno, T., 2014. Multiple tracer study in Horonobe, northern Hokkaido, Japan: 1: Residence time estimation based on multiple environmental tracers and lumped parameter models. *Journal of Hydrology*. 519, 532-548.
- Kiguchi, T., Ito, H., Kuwahara, Y., Miyazaki, T., 2001. Estimating the permeability of the Nojima Fault zone by a hydrophone vertical seismic profiling experiment. *Island*

- Arc. 10, 348-356.
- Kitagawa, Y., Fujimori, K., Koizumi, N., 2007. Temporal change in permeability of the Nojima fault zone by repeated water injection experiments. *Tectonophysics*. 443, 183-192.
- Ko, M.K.W., 1993. Atmospheric sulfur hexafluoride: sources, sinks and greenhouse warming. *Journal of Geophysical Research*. 98, 10499-10507.
- Law, C.S., Watson, A.J., Liddicoat, M.I., 1994. Automated vacuum analysis of sulphur hexafluoride in seawater: derivation of the atmospheric trend (1970-1993) and potential as a transient tracer. *Mar.Chem.* 48, 57-69.
- Maiss, M., Brenninkmeijer, C.A.M., 1998. Atmospheric SF₆: Trends, sources, and prospects. *Environmental Science and Technology*. 32, 3077-3086.
- Mamada, Y., Kuwahara, Y., Ito, H., Takenaka, H., 2004. Discontinuity of the Mozumi-Sukenobu fault low-velocity zone, central Japan, inferred from 3-D finite-difference simulation of fault zone waves excited by explosive sources. *Tectonophysics*. 378, 209-222.
- Mamada, Y., Kuwahara, Y., Ito, H., Takenaka, H., 2002. 3-D finite-difference simulation of seismic fault zone waves - Application to the fault zone structure of the Mozumi-Sukenobu fault, central Japan. *Earth, Planets and Space*. 54, 1055-1058.
- Mizoguchi, K., Hirose, T., Shimamoto, T., Fukuyama, E., 2008. Internal structure and permeability of the Nojima fault, southwest Japan. *J.Struct.Geol.* 30, 513-524.
- Niwa, M., Kurosawa, H., Ishimaru, T., 2011. Spatial distribution and characteristics of fracture zones near a long-lived active fault: A field-based study for understanding changes in underground environment caused by long-term fault activities. *Eng.Geol.* 119, 31-50.
- Nohara, T., Tanaka, H., Watanabe, K., Furukawa, N., Takami, A., 2006. In situ hydraulic tests in the active fault survey tunnel, Kamioka Mine, excavated through the active Mozumi-Sukenobu Fault zone and their hydrogeological significance. *Island Arc*. 15, 537-545.
- Oohashi, K., Hirose, T., Kobayashi, K., Shimamoto, T., 2012. The occurrence of graphite-bearing fault rocks in the Atotsugawa fault system, Japan: Origins and implications for fault creep. *J.Struct.Geol.* 38, 39-50.
- Plummer, L.N., Busenberg, E., 2000. Chlorofluorocarbons. In: Cook, P., Herczeg, A.L. (Eds.), *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology*. Kluwer Academic

- Publishers, Norwell, 441–478.
- Ravishankara, A.R., Solomon, S., Turnipseed, A.A., Warren, R.F., 1993. Atmospheric lifetimes of long-lived halogenated species. *Science*. 259, 194-199.
- Satake, H., Murata, M., Hayashi, H., 2003. Chemical characteristics of groundwater around the Mozumi-Sukenobu fault and the implication for fault activity. *Geophys.Res.Lett.* 30, 8-1.
- Tadokoro, K., Nishigami, K., Ando, M., Hirata, N., Iidaka, T., Hashida, Y., et al., 2001. Seismicity changes related to a water injection experiment in the Nojima Fault Zone. *Island Arc*. 10, 235-243.
- Takeuchi, A., Ongirad, H., Akimitsu, T., 2003. Recurrence interval of big earthquake along the Atotsugawa fault system, central Japan: Results of seismo-geological survey. *Geophys.Res.Lett.* 30, MOZ 2-1 - 2-4.
- Tanaka, H., Hinoki, S.-., Kosaka, K., Lin, A., Takemura, K., Murata, A., et al., 2001. Deformation mechanisms and fluid behavior in a shallow, brittle fault zone during coseismic and interseismic periods: Results from drill core penetrating the Nojima Fault, Japan. *Island Arc*. 10, 381-391.
- Wanninkhof, R., Ledwell, J.R., Watson, A.J., 1991. Analysis of sulfur hexafluoride in seawater. *J.Geophys.Res.* 96, 8733-8740.
- Weiss, R.F., 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Mar.Chem.* 2, 203-215.
- Weiss, R.F., 1970. The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and seawater. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*. 17, 721-735.

研究報告 2

岩石き裂の治癒作用を利用した不連続面の バリア性能向上に関する研究

鳥取大学 大学院工学研究科

奈良 禎太

【要約】

放射性廃棄物の地層処分においては、岩盤を天然バリアとして使用する。このことから、岩盤には高い長期強度と遮蔽性が要求される。岩盤内では、き裂や空隙のネットワークが流体の流路となるため、遮蔽性向上には、き裂の進展を防ぐとともに、き裂や空隙を閉塞させることが効果的であると考えられる。また、水は岩石の強さに顕著に影響し、含水率が高い場合、岩石の強さは低下する。そのため、遮蔽性が高い領域で囲まれた岩盤は、水の流入が抑制されるため、強度が高い状態が確保されやすく、力学的に安定しやすい状況になると考えられる。流路の形状が複雑なほど流れは抑制されるため、微細な粒子が密に詰まった部分では遮蔽性は高くなる。日本では地殻運動が活発であり、地下には断層や節理などの不連続面が数多く分布する。ゆえに、地下利用の際、不連続面を完全に避けることは困難である。ただし、巨視き裂を含む火成岩では、巨視き裂に断層粘土を含めることにより、透水係数が低下することが示されている。また、岩石とコンクリートを水中に一緒に保存すると、岩石表面にカルシウム化合物が析出することが示された。これらの効果を利用すれば、治癒した節理や断層を利用する形で岩石の遮蔽性を高められる可能性があり、放射性廃棄物処分で大いに役立つ技術を確立できると考えられる。ただし現状では、節理や断層がどの程度バリア性能を有するかについては十分には検討されていない。

そこで本研究では、岩石内の節理や断層の遮蔽性（バリア性能）を、破壊力学試験と透水試験を用いて調べる。特に、岩石のき裂進展とその閉塞を同時に起こす試験を行い、さらに、閉塞に寄与した析出物の同定を行うことにより、析出物の力学的耐久性を理解する。また、節理や断層等の不連続面を有する試験片を用いて透水試験を行うことにより、断層や節理のバリア性能を向上させ、その基礎情報を得ることを目標とする。

平成 26 年度は、初年度として、破壊力学および透水試験を行う環境を整備し、予備試験を実施することとした。特に、破壊力学試験法であるダブルトーション法による測定を予備実験として 1～2 週間程度連続で行うことにより、長期連続測定によるき裂進展データ取得環境の整備を実施した。透水試験に関しては、岩石試料（花崗岩）を用いて透水試験の予備実験を行うことにより、岩石の遮蔽性（バリア性能）に関するデータ取得環境の整備を実施した。

破壊力学試験については、ダブルトーション試験装置を恒温恒湿器内に組み立てることによって、長期間周辺環境を一定に保てる破壊力学試験装置を準備した。さらに、応力拡大係数とき裂進展速度のデータを長期間にわたって取得できるようにするため、データ取得間隔を長期にわたって制御できるデータロガーとデータ取得用のパソコンを試験装置に接続することによって、長期間連続して行うダブルトーション試験を行えるようにした。その上で、大島花崗岩を試料として予備試験を行った。その結果、10 日間の連続測定を無事に行えることを確認し、応力拡大係数とき裂進展速度の関係を得られることを確認した。

透水試験については、稲田花崗岩を試料として、トランジェントパルス法による透水試験の予備試験を行った。その結果、試験装置が問題なく作動し、岩石の透水係数に関するデータが得られることを確認した。

破壊力学試験では、従来よりも低いき裂進展速度の測定に成功したものの、き裂進展限界の検出には至らなかった。今後はき裂修復が起こりやすい環境下で長期間試験をするような工夫をすることが課題であると考えられる。また、透水試験では、断層や節理のような不連続面を含む試料で透水係数を測定できていないため、今後は不連続面を含む試料を準備し、透水試験を行う必要があると考えられる。ま

た、天然系のき裂および断層粘土を含む試料を準備することによって、実際の断層が有する遮蔽性能を調べることも今後の課題の一つである。

目次

1. 緒論.....	1
2. 破壊力学試験.....	3
2.1 試験方法の概要.....	3
2.2 応力拡大係数の評価原理.....	4
2.3 き裂進展速度の評価原理.....	7
2.4 試験装置.....	9
2.5 試験手順.....	12
2.6 岩石試料.....	13
2.7 試験結果.....	15
2.8 考察.....	18
3. 透水試験.....	20
3.1 試験方法の概要.....	20
3.2 透水係数の評価原理.....	20
3.3 試験装置.....	22
3.4 試験手順.....	24
3.5 岩石試料.....	24
3.6 試験結果.....	25
3.7 考察.....	27
4. 結論.....	29
謝辞.....	30
参考文献.....	31

1. 緒論

放射性廃棄物の地層処分においては、岩盤を天然バリアとして使用する。このことから、岩盤には高い長期強度と遮蔽性が要求される。

長期強度の評価のためには、岩石の変形・破壊挙動の時間依存性に関する情報が必要である。ここで、岩石の破壊は微視き裂の発生、伸長及び集積、局所化によって説明される。そのため、岩石内のき裂進展に関する研究が重要であると考えられる。従来の破壊力学では、き裂先端の応力拡大係数がある臨界値、すなわち破壊じん性に達したとき、き裂の進展が起こると考えられてきた。しかし、実際は、応力拡大係数が破壊じん性に達していない状態においても、き裂は緩やかに進展する。このき裂進展現象は、サブクリティカルき裂進展¹⁾と呼ばれ、き裂進展の時間依存性の代表的なものとして挙げられる。特にケイ酸塩岩石においては、引張応力を受けたき裂先端部のシロキサン結合が、水と化学反応を起こして劣化・分断する現象である応力腐食が、サブクリティカルき裂進展の主要な機構であると考えられている¹⁾。一般に、サブクリティカルき裂進展におけるき裂進展速度 da/dt と応力拡大係数 K_I の関係は、次の指数則²⁾と累乗則³⁾の2通りの関係でまとめられる。

$$\frac{da}{dt} = v_0 \exp\left(\frac{-E^\ddagger + \beta K_I}{RT}\right) \quad (1)$$

$$\frac{da}{dt} = AK_I^n \quad (2)$$

ここで、 E^\ddagger は活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は絶対温度であり、その他は実験より求められる定数である。岩石破壊の時間依存性を考える場合には、上記のき裂進展速度と応力拡大係数の関係を求めるとともに、上記の関係式から得られる定数について十分な情報を得る必要がある。これまで行われたサブクリティカルき裂進展に関する研究では、測定されているき裂進展速度の範囲は、おおよそ $10^{-2} \sim 10^{-8}$ m/s のオーダーである^{1,4,5)}。

放射性廃棄物地層処分のように極めて長い期間岩盤を利用するようなことを考える場合、より低いオーダーのき裂進展速度を測定し、応力拡大係数とき裂進展速度の関係をより明確にする必要があると考えられる。また、一部の人工材料においては、き裂進展と修復が同時に起こることによって現れるサブクリティカルき裂進展限界に相当する応力拡大係数が認められている²⁾。サブクリティカルき裂進展限界が認められる場合のき裂進展速度と応力拡大係数の概要図を図1に示す。図1において、 K_{Ic} は破壊じん性、 K_0 はサブクリティカルき裂進展限界を示す。しかしながら、岩石ではこのような応力拡大係数は認められていない。サブクリティカルき裂進展限界を抽出するためには、極めて低いき裂進展速度を計測する必要があるため、試験時間も長期にわたる必要がある。ゆえに、長期にわたるサブクリティカルき裂進展計測を実現できる設備を開発し、実際に長期間にわたってき裂進展計測を行うことが、従来より低いき裂進展速度の測定とサブクリティカルき裂進展限界の抽出において必要と言える。

また岩盤内では、き裂や空隙のネットワークが流体の流路となるため⁶⁾、遮蔽性向上には、き裂の進展を防ぐとともに、き裂や空隙を閉塞させることが効果的であると考えられる。また、水は岩石の強さに顕著に影響し、含水率が高い場合、岩石の強さ⁷⁾や破壊じん性⁸⁾は低下する。そのため、遮蔽性が高い領域で囲まれた岩盤は、水の流入が抑制されるため、強度が高い状態が確保されやすく、力学的に安定しやすい状況になると考えられる。流路の形状が複雑なほど流れは抑制されるため、微細な粒子が密

に詰まった部分では遮蔽性は高くなる。日本では地殻運動が活発であり、地下には断層や節理などの不連続面が数多く分布する。ゆえに、地下利用の際、不連続面を完全に避けることは困難である。ただし、巨視き裂を含む火成岩では、巨視き裂に断層粘土を含めることにより、透水係数が低下することが示されている⁹⁾。また、岩石とコンクリートを水中に一緒に保存すると、岩石表面にカルシウム化合物が析出することが示された¹⁰⁾。これらの効果を利用すれば、治癒した節理や断層を利用する形で岩石の遮蔽性を高められる可能性があり、放射性廃棄物処分で大いに役立つ技術を確立できると考えられる。ただし現状では、節理や断層がどの程度バリア性能を有するかについては十分には検討されていない。

そこで本研究では、岩石内の節理や断層の遮蔽性（バリア性能）を、破壊力学試験と透水試験を用いて調べる。特に、岩石のき裂進展とその閉塞を同時に起こす試験を行い、さらに、閉塞に寄与した析出物の同定を行うことにより、析出物の力学的耐久性を理解する。また、節理や断層等の不連続面を有する試験片を用いて透水試験を行うことにより、断層や節理のバリア性能を向上させ、その基礎情報を得ることを目標とする。

平成 26 年度は、初年度として、破壊力学および透水試験を行う環境を整備し、予備試験を実施することとし、特に次のことを検討項目とした。

- 1) 破壊力学試験法であるダブルトーション法による測定を予備実験として 1～2 週間程度連続で行うことにより、長期連続測定によるき裂進展データ取得環境の整備を実施する。
- 2) 岩石試料（花崗岩）を用いて透水試験の予備実験を行うことにより、岩石の遮蔽性（バリア性能）に関するデータ取得環境の整備を実施する。

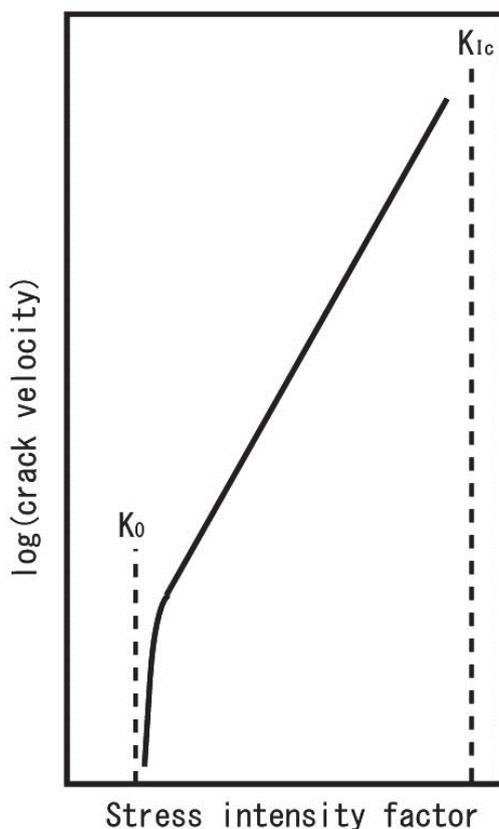


図 1 サブクリティカルき裂進展におけるき裂進展速度と応力拡大係数の関係の概要図

K_{Ic} : 破壊じん性, K_0 : サブクリティカルき裂進展限界

2. 破壊力学試験

2.1 試験方法の概要

サブクリティカルき裂進展の測定のために用いられる代表的な破壊力学試験方法として、ダブルトーション (Double Torsion, DT) 試験¹¹⁻¹³⁾が挙げられる。これらの試験方法のうち、DT 試験は、応力拡大係数の評価にき裂の長さの計測が不要である、試験片形状が単純である、载荷形式が単純であるなどの利点をもつことから、岩石のような、不透明な材料における試験法として広く用いられてきた試験方法である。

図2に、DT 試験で用いられる試験片の概要図を示す。この図に示されるように、DT 試験片の形状は、長方形断面の薄板状である。試験片の中央部にき裂を進展させるために、試験片にガイド溝が形成され、さらにイニシャルノッチが切り込まれることが多い。本年度の試験では、図2にあるような、ガイド溝とイニシャルノッチを切り込んだ形状の試験片を用いた。また、DT 試験では、試験片は4点曲げの要領で载荷され、下側の面に引張応力が作用して、き裂進展が起こるような試験方法である。

本研究では、定変位法^{12,13)}によるダブルトーション試験を行い、き裂進展速度と応力拡大係数の関係を求めることとした。定変位法では、着力点の変位を一定に保ち、き裂進展に伴う荷重緩和を測定することによって、き裂進展速度と応力拡大係数が評価される。この方法では、試験片に加えられる荷重が時間の関数となり、き裂進展速度が荷重緩和速度から求められるので、1回の試験から広い範囲 (通常 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ m/s) のき裂進展速度と応力拡大係数の関係が得られる。ゆえに、定変位法は、多くの研究者によって用いられてきた¹⁾。

以降の節において、応力拡大係数とき裂進展速度の評価原理について説明する。特に、き裂進展速度については、定変位法に関して説明する。

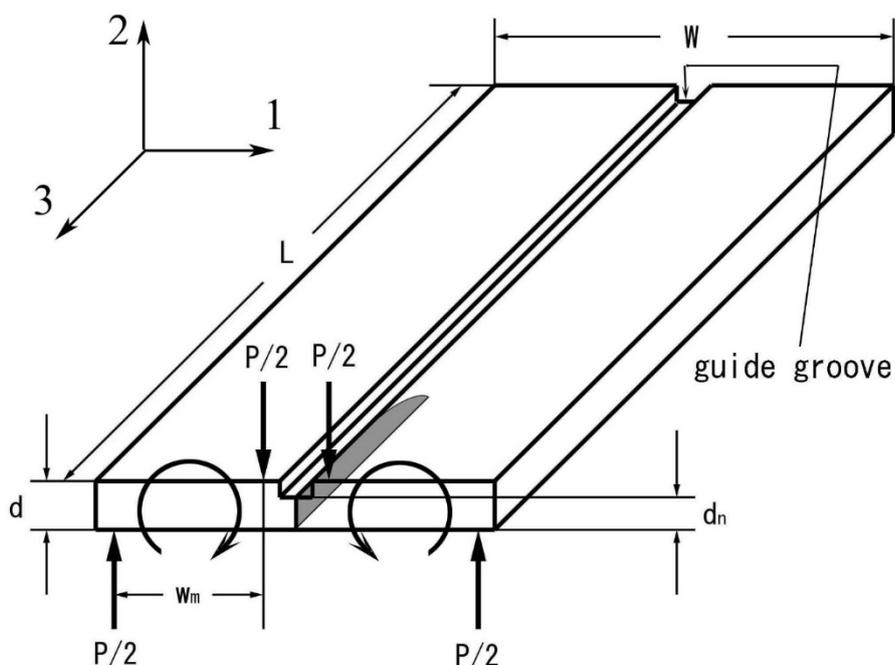


図2 ダブルトーション試験片の形状と载荷形式の概要図

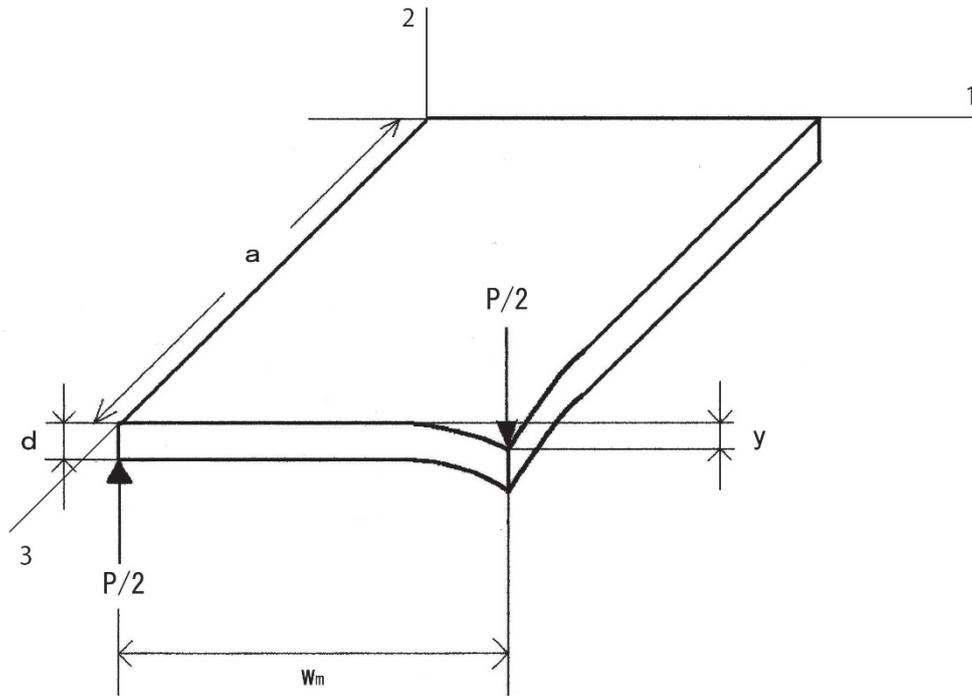


図3 薄板のねじり

2.2 応力拡大係数の評価原理

DT 試験における評価原理を説明する。DT 試験片は、トルクを受けた 2 枚の薄板が組み合わされたものと考えることができる¹²⁾。この薄板のねじりの様子を図3に示す。この薄板に加えられる荷重を $P/2$ (試験片に加えられる荷重が P) とすると、ねじれ角 θ は、次のように表される¹⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} \theta &\approx \frac{y}{w_m} \approx \frac{6T_q a}{Wd^3 G} \\ T_q &= \frac{P}{2} w_m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 y は着力点の変位、 w_m はモーメントアーム、 T_q はトルク、 a はき裂の長さ、 $W/2$ は薄板の幅 (W が DT 試験片の幅となる)、 d は薄板の厚さ、 G は材料の剛性率である。この式は、次のように書き換えることができる。

$$\frac{y}{P} = \frac{3w_m^2 a}{Wd^3 G} = \lambda \quad (4)$$

ここで、 λ は試験片のコンプライアンス (DT 試験片に加えられる荷重と着力点の変位との関係を示す荷重-変位曲線から求めたコンプライアンス) である。

ひずみエネルギー解放率 g は、試験片のコンプライアンス λ と、次のように関係づけられる¹⁵⁾。

$$g = \frac{P^2}{2} \left(\frac{d\lambda}{dA_c} \right) \quad (5)$$

ここで、 A_c はき裂の面積である。き裂前縁部の形状がき裂の長さに依存しないとすると、この式は次のようになる。

$$g = \frac{P^2}{2d_n} \left(\frac{d\lambda}{da} \right) \quad (6)$$

ここで、 d_n はき裂が進展している部分での板の厚さである。

き裂が到達していない部分の変形量が無視できるものとする、式(4)をき裂の長さ a に関して微分し、式(6)に代入することによって、ひずみエネルギー解放率 g が、次のように表される。

$$g = \frac{3P^2 w_m^2}{2Wd^3 d_n G} \quad (7)$$

応力拡大係数 K_I とひずみエネルギー解放率 g は、次のように関係づけられる¹⁵⁾。

$$K_I = \sqrt{Eg} \quad (8)$$

ここで、 E は材料のヤング率である。式(7)を式(8)に代入し整理すると、次の式が得られる。

$$K_I = \sqrt{\frac{3EP^2 w_m^2}{2Wd^3 d_n G}} \quad (9)$$

ヤング率 E と剛性率 G は、次のように関係づけられる。

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (10)$$

ここで、 ν は材料のポアソン比である。式(10)を式(9)に代入すると、次の式が得られる。

$$K_I = Pw_m \sqrt{\frac{3(1 + \nu)}{Wd^3 d_n}} \quad (11)$$

材料が等方性である場合、DT 試験における応力拡大係数は、この式によって評価される。DT 試験においては、応力拡大係数はき裂の長さに依存しないことが、この式に表されている。

続いて、材料が直交異方性を示す場合について述べる。直交異方性材料の薄板が図2のような方向で载荷される場合、異方性材料の弾性コンプライアンス定数を s_{ij} ($i, j = 1 \sim 6$) とすると、薄板上の着力点 (x_3, x_1) の変位 y は、次のように与えられる¹⁶⁾。

$$y = L_1 x_1^2 + L_4 x_1 x_3 + L_3 x_3^2 + M_1 x_1 + M_3 x_3 + M_0 \quad (12)$$

ここで、 M_0, M_1, M_2 は、境界条件によって決まる係数である。また、 L_1, L_3, L_5 は、次のように表される。

$$L_1 D_{1m}^* + L_3 D_{3m}^* + L_5 D_{5m}^* = -\frac{P \delta_{m5}}{8} \quad (m = 1, 3 \text{ or } 5) \quad (13)$$

ここで、 δ_{mp} はクロネッカーのデルタであり、次のように与えられる。

$$\delta_{mp} = \begin{cases} 1 (m = p) \\ 0 (m \neq p) \end{cases} \quad (14)$$

また、 D_{nm}^* ($n = 1, 3 \text{ or } 5$) は、異方性材料の弾性コンプライアンス定数 s_{ij} および薄板の厚さ d と、次のように関係づけられる。

$$\left. \begin{aligned} D_{nm}^* &= \frac{d^3(s_{nk}s_{mk} - s_{nm}s_{kk})}{12 \det(s_{ij})} \\ D_{mm}^* &= \frac{d^3(s_{jj}s_{kk} - s_{jk}^2)}{12 \det(s_{ij})} \end{aligned} \right\} \quad (k = 1 \sim 6) \quad (15)$$

ここで、 $\det(s_{ij})$ は、 s_{ij} の行列式を表す。式(15)では、 s_{ij} についてはマトリックス表記を用いており、テンソルの総和規約は適用されない。

$(0, 0)$, $(0, w_m)$ および $(a, 0)$ の3点が固定される時、式(12)は次のようになる。

$$y = L_1(x_1^2 - ax_1) + L_5x_1x_3 + L_3(x_3^2 - w_mx_3) \quad (16)$$

材料が直交異方性で、かつ異方性の主軸が薄板の座標軸と一致すると仮定すると、式(12)と式(13)から、次の式が得られる。

$$L_5 = -\frac{3Ps_{55}}{2d^3} \quad (17)$$

これを式(16)に代入すると、着力点 (a, w_m) の変位 y および、試験片のコンプライアンス λ は、それぞれ次のように表される。

$$y = -\frac{3Ps_{55}aw_m}{2d^3} \quad (18)$$

$$\lambda = \frac{3s_{55}aw_m}{2d^3} \quad (19)$$

き裂面の面積は $a \times d_n$ で与えられるので、ひずみエネルギー解放率 g は、次のように与えられる。

$$g = \frac{3P^2w_ms_{55}}{4d^3d_n} \quad (20)$$

ひずみエネルギー解放率 g と応力拡大係数 K_I は、次の式で関係づけられる¹⁷⁾。

$$g = K_I^2 \left(\frac{s_{11}((s_{11}s_{33})^{1/2} + s_{13} + s_{55}/2)}{2} \right)^{1/2} \quad (21)$$

したがって、直交異方性材料の DT 試験片での応力拡大係数は、次のように表される¹³⁾。

$$K_I = \left(\frac{3P^2w_ms_{55}}{(2d^3d_n(2s_{11}((s_{33}s_{11})^{1/2} + s_{31} + s_{55}/2))^{1/2})} \right)^{1/2} \quad (22)$$

ただし、この式は、図2に示されているような、き裂が軸3方向に進行し、軸1方向に開口するような試験片における式であるため、き裂が他の方向に進行および開口する場合は、添字の変換を行えばよい。また、式(22)の弾性コンプライアンス定数 s_{ij} が等方性を示し、式(9)で $w_m = W/2$ である場合、式(9)と式(22)は一致する。

式(9)および式(22)で表されるように、DT 試験法では、応力拡大係数がき裂長に依存しない。そのため、岩石のような不透明でき裂の長さの正確な測定が困難な材料において非常に有効な試験方法であるといえる。

2.3 き裂進展速度の評価原理

はじめに、材料が等方性である場合のき裂進展速度の評価原理について説明する。DT 試験片においては、試験片のコンプライアンス λ とき裂の長さ a との間には、次の関係が成り立つことが経験的に知られている¹⁸⁾。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{y}{P} = Ba + D \\ B &= \frac{3w_m^2}{Wd^3G} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

ここで、 D は実験的に求められる定数である。この式は、次のように変形できる。

$$a = \frac{y}{BP} - \frac{D}{B} \quad (24)$$

定変位法では、着力点の変位が一定に保たれ、き裂進展に起因する荷重緩和が起こる。このときの時間と変位および荷重の関係の概要図を図4に示す。着力点の変位 y が一定であるとき、この式を時間 t に関して微分することによって、次の式が得られる。

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_{y=const} = -\frac{y}{BP^2} \frac{dP}{dt} \quad (25)$$

変位 y が一定であることから、式(23)より、次の関係式が成立する。

$$y = P\lambda = P_1\lambda_1 \quad (26)$$

ここで、 P_1 は荷重の初期値、 λ_1 は初期き裂長 a_1 における試験片のコンプライアンスである。この式を式(25)に代入すると、次の式が得られる。

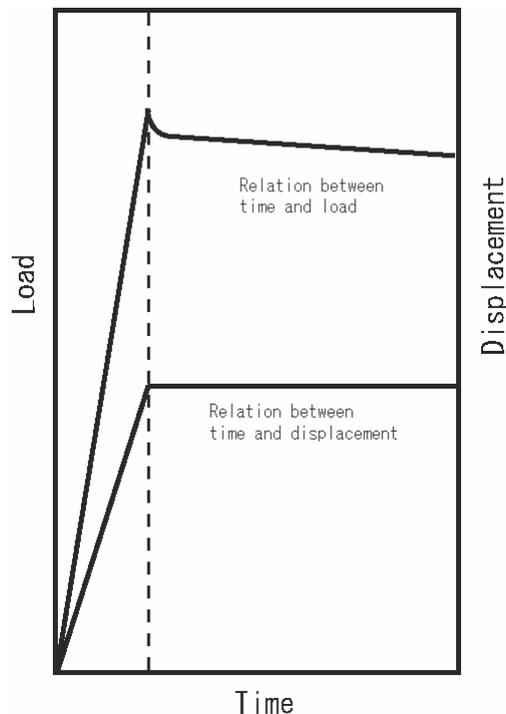


図4 定変位法における荷重と着力点の変位の時間変化の概要図

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{y=const} = -\frac{P_1\lambda_1}{BP^2} \frac{dP}{dt} \quad (27)$$

式(27)は、薄板の解に基づいているため、き裂前縁部の形状は直線的で、厚さ方向に垂直と取り扱われる。しかしながら、DT 試験片では、クラックフロントは傾斜している^{12,19)}。さらに、Williams & Evans¹²⁾によって、き裂進展がき裂前縁部に垂直な方向に生じることが実験的に確認されている。したがって、き裂前縁部の形状を考慮した校正係数が必要となる。ゆえに、定変位法におけるき裂進展速度は、次のように表される。

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{y=const} = -C_a \frac{P_1\lambda_1}{BP^2} \frac{dP}{dt} \quad (28)$$

ここで、 C_a は校正係数であり、次のように与えられる¹⁹⁾。

$$C_a = \frac{d_n}{\sqrt{\Delta c^2 + d_n^2}} \quad (29)$$

ここで、 Δc は試験片の下側の面でのき裂長と上側の面でのき裂長との差である。

続いて、材料が直交異方性を示す場合についてのき裂進展速度の評価原理について説明する。DT 試験片においては、着力点の変位 y とき裂の長さ a との間には、次の関係が成り立つことが経験的に知られている¹⁸⁾。

$$y = P(B_a a + D) \quad (30)$$

ここで、 B_a は定数である。一般に $B_a \gg D$ であるので、式(30)を式(18)と比較すると、 B_a は次のように表される。

$$B_a = \frac{3s_{55}w_m}{2d^3} \quad (31)$$

式(30)を時間 t について微分すると、次の式が得られる。

$$\frac{dy}{dt} = (B_a a + D) \frac{dP}{dt} + B_a P \frac{da}{dt} \quad (32)$$

定変位法では、着力点の変位 y が一定であるので、式(32)に $dy/dt = 0$ を代入すると、次の式が得られる。

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{y=const} = -\frac{P(B_a a + D)}{B_a P^2} \frac{dP}{dt} \quad (33)$$

変位 y が一定であることから、次の式が成り立つ。

$$y = P(B_a a + D) = P_1(B_a a_i + D) = P_1\lambda_1 \quad (34)$$

したがって、式(31)と式(33)より、次の式が得られる。

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{y=const} = -\frac{2P_1\lambda_1 d^3}{3s_{55}w_m P^2} \frac{dP}{dt} \quad (35)$$

前にも述べたように、DT 試験片では、き裂前縁部は傾いており、き裂進展はき裂前縁部に垂直な方向

に生じる¹²⁾。ゆえに、クラックフロントの形状を考慮するために、式(29)で与えられる校正係数 C_a が必要となる。この結果、直交異方性材料を用いた場合の定変位法 DT 試験におけるき裂進展速度は、次のように表される。

$$\left(\frac{da}{dt}\right)_{y=const} = -C_a \frac{2P_i \lambda_i d^3}{3s_{55} w_m P^2} \frac{dP}{dt} \quad (36)$$

弾性コンプライアンス定数 s_{ij} が等方性を示し、 $w_m = W/2$ となるとき、等方性仮定の評価式（式(28)）と異方性仮定の評価式（式(36)）は一致する。

なお、本研究では、Williams & Evans¹²⁾および Atkinson¹⁹⁾の研究を参考にして、 $C_a = 0.2$ としてき裂進展速度の評価を行った。

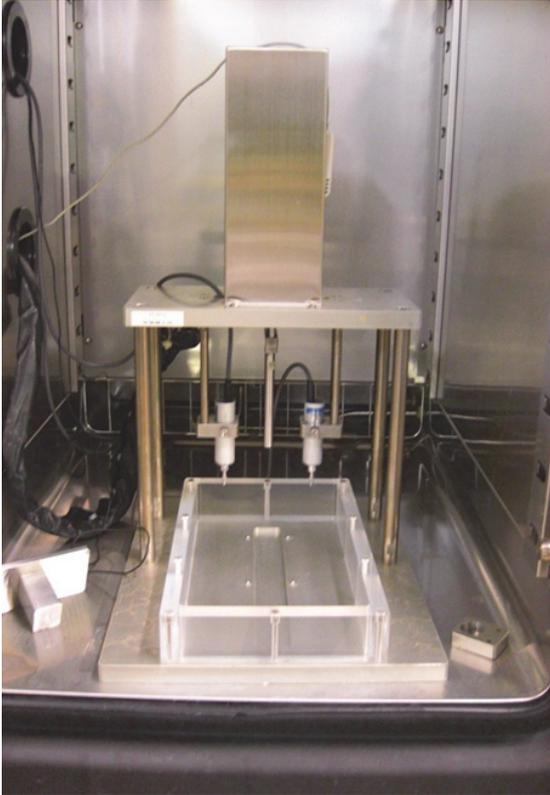
2.4 試験装置

定変位法では、着力点の変位を一定に保ち、亀裂進展に伴う荷重緩和を測定することによって、亀裂進展速度が評価される。図4に示されるように、この方法では、試験片に加えられる荷重が時間の関数となり、き裂進展速度が荷重緩和速度から求められるので、1回の試験から広い範囲（通常 $10^{-2} \sim 10^{-8}$ m/s）のき裂進展速度と応力拡大係数の関係が得られる。

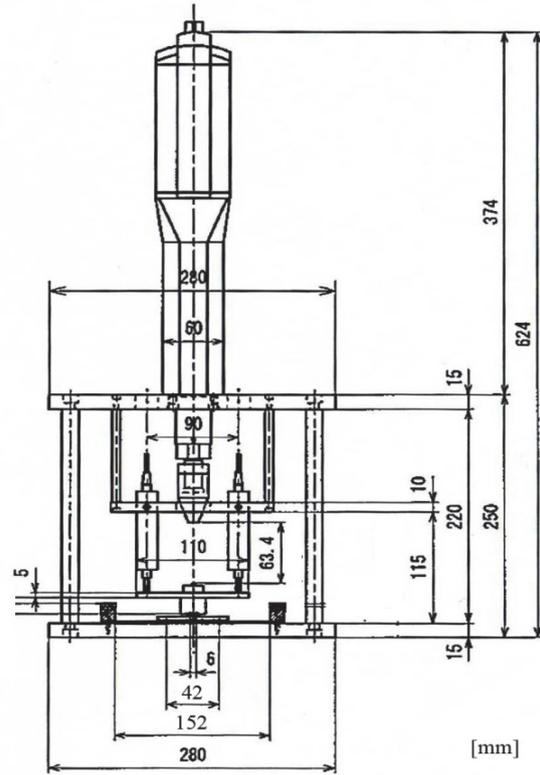
ただし、定変位法はき裂進展速度と応力拡大係数の関係を求めるのに好都合ではあるが、き裂進展以外の要因による荷重緩和、例えば、試験装置や載荷ジグなどの変形に起因する荷重緩和に注意する必要がある。定変位法では、き裂進展のみに起因する荷重緩和を測定するため、剛性の高い試験装置を用いて、装置に起因する荷重緩和を極力抑制する必要がある。また、周辺環境の温度変化により、熱膨張・熱収縮による装置の変形が起こる可能性があるため、試験中は、周辺環境の温度を一定にする必要がある。もしき裂進展以外の要因による荷重の変化が起こると、応力拡大係数およびき裂進展速度の評価値に誤差が生じ、結果として、求められたき裂進展速度と応力拡大係数の関係の信頼性が低下する²⁰⁾。

ゆえに、岩石のサブクリティカルき裂進展現象を詳細に検討する上で要求される定変位法DT試験装置の要件として、試験装置の剛性を高くすることと、温度・湿度の制御が可能であり、試験片・装置を含めて、試験中これらが一定に保たれることが極めて重要であるといえる。

上記の要件を考慮して作成した定変位法 DT 試験装置を図5に示す。図5aは装置の写真、図5bは概要図である。この装置では、鉛直方向に動く電動シリンダーによって、試験片の上側から直径4mmのボールベアリングを介して2点で載荷して、試験片にねじりモーメントを加えるような仕組みになっている。モーメントアーム w_m は18mmである。また、電動シリンダーの軸と試験片はステンレス製であるため、岩石よりもはるかに剛性が高くなっている。なお、この試験装置は、温度と湿度が制御可能な恒温槽（いすゞ製作所製・TPAV-120-20）の内部に設置している。恒温槽の写真を図6に示す。これにより、試験中の温度変化を防げるため、装置の熱膨張や熱収縮に起因する荷重緩和を防ぐことができる仕組みとなっている。



a : DT 試験装置の写真



b : DT 試験装置の概要図 (単位 : mm)

図5 ダブルトーション試験装置



図6 DT 試験装置を設置した恒温槽の概観 (高さ 1445mm)

また、DT 試験では、試験片に初期き裂を導入することが必須である²¹⁾。本研究では、初期き裂を導入するための装置として、Nara & Kaneko²²⁾によって用いられた装置を利用した。その装置の写真および概要図を図7に示す。この装置では、DT 試験片の下にデジタルマイクロscopeを備え付けており、試験片に引張応力がかかる面を載荷時に直接観察できるようになっている。つまり、試験片中を進展しているき裂を直接観察できるようになっている。デジタルマイクロscopeで観察された画像を図8に示す。図8aは初期き裂導入前の画像、図8bは初期き裂導入後の画像である。これより、試験片への初期き裂の導入が確実にできていることがわかる。

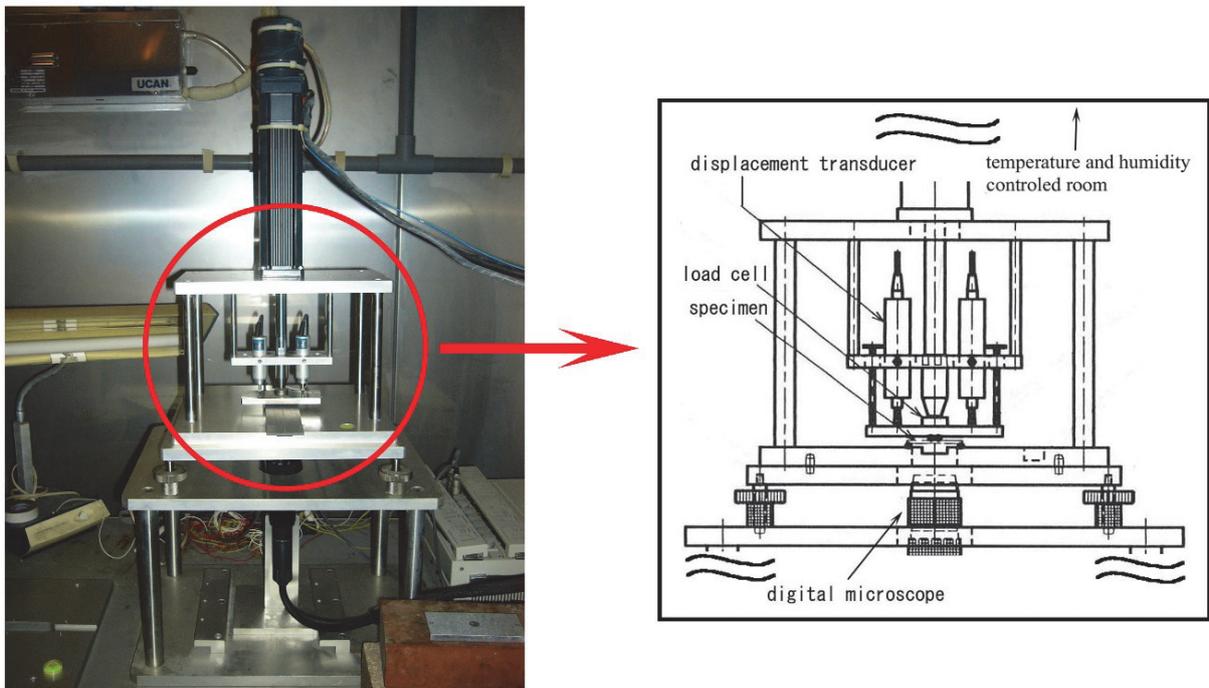
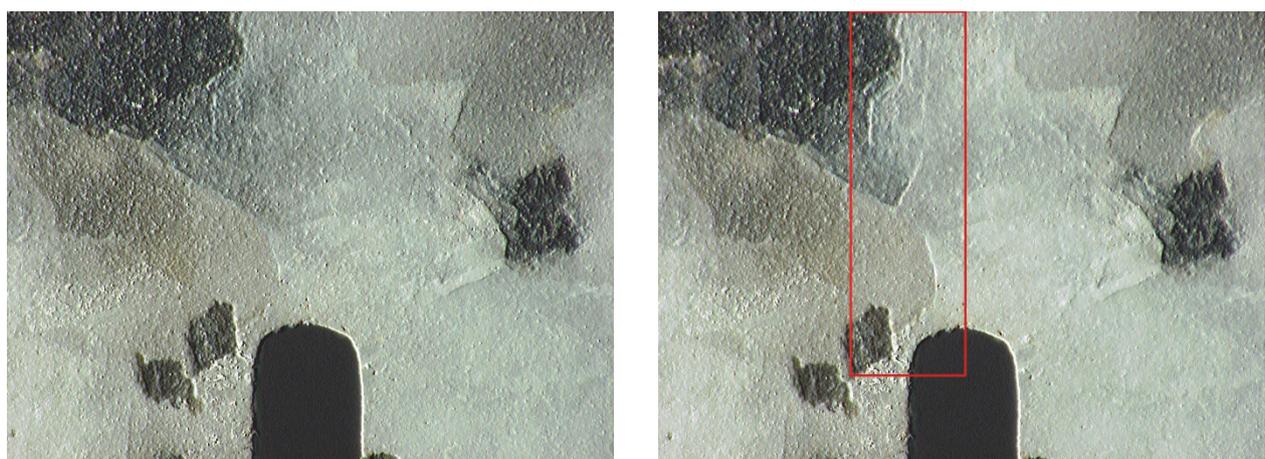


図7 初期き裂導入用の試験装置



a: 初期き裂導入前

b: 初期き裂導入後

図8 デジタルマクロscopeで観察された画像
(幅: 2.3mm, 高さ: 2.0mm, 試料: 大島花崗岩)

2.5 試験手順

初めに、DT 試験片に初期き裂を導入した。初期き裂の導入は、DT 試験片を試験装置に設置して、着力点を約 $4\mu\text{m}$ ずつ変位させた後変位を一定に保つという手順を繰り返すことによって行った。また、デジタルマイクロスコープにより、この間のき裂伸長を観察し、き裂長が Trantina²³⁾によって示されている下限値に相当する 25mm に達するまで繰り返した。デジタルマイクロスコープにより観察された初期き裂の画像は、図 8b を参照されたい。

初期き裂の導入後は、試験片を試験環境に馴染ませるために、試験片を無負荷状態で、試験時と同一の環境条件下に約 20 時間静置させた。

この後、き裂進展速度の計算に必要な試験片のコンプライアンスの初期値 λ_i の測定を行った。 λ_i は、き裂のさらなる進展が起こらないように、着力点を約 $4\mu\text{m}$ ずつ緩やかに変位させることによって荷重と変位を測定し、荷重が 14N に達するまでの着力点の変位と荷重との関係から評価した。 λ_i の測定で用いられた荷重と変位（2 本の変位計の出力の平均）との関係の一例を、図 9 に示す。

このような操作の後に、定変位試験を行った。定変位試験では、試験片に $13\sim 14\text{N}$ の予荷重を緩やかに加えた後、着力点を急速に変位させ、その変位を約 2 時間一定に保った。予荷重を加えた後の着力点の変位量は、Nara & Kaneko²⁴⁾に従い、 0.24mm とした。

き裂進展速度の計算には、荷重 P とその低下率、すなわち荷重緩和速度 dP/dt が必要となる。荷重緩和速度は、荷重緩和曲線の傾きに相当する。本研究では、荷重緩和曲線において、荷重が 0.4N 減少する範囲のデータを、最小二乗法を用いて直線近似することによって評価した。荷重 P には、その範囲での荷重の平均値を用いた。本研究で得られた荷重緩和曲線を図 10 に示す。

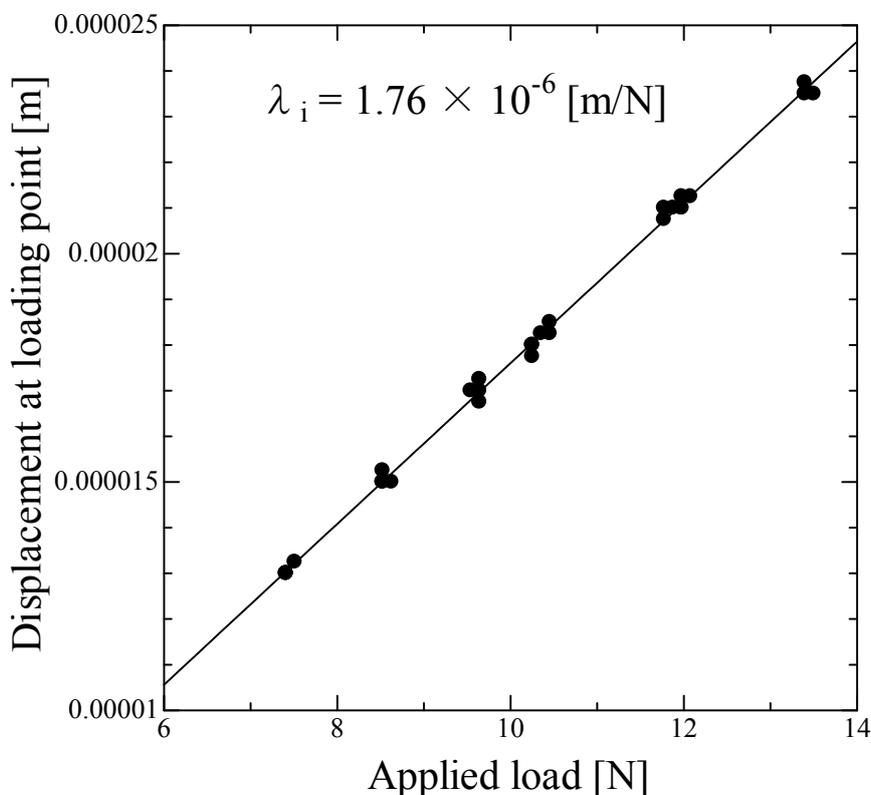


図 9 DT 試験片に加えられた荷重と着力点の変位の関係
このグラフの傾きがコンプライアンスに相当する

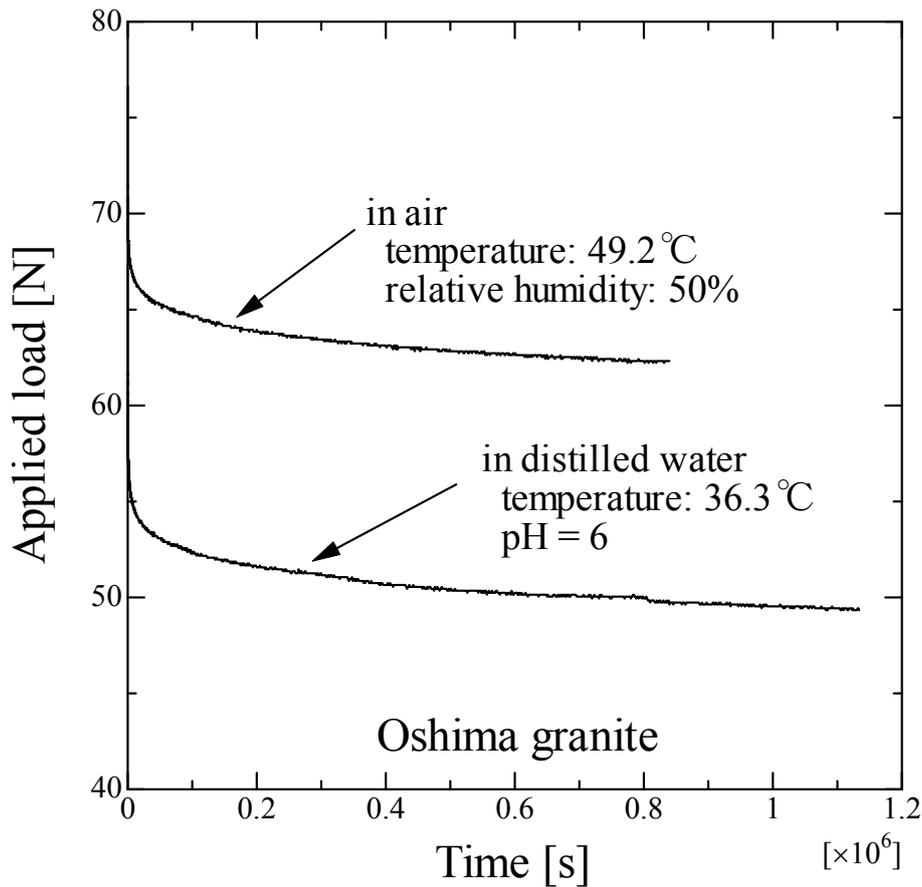


図 1 0 荷重緩和曲線

2.6 岩石試料

本年度の破壊力学試験においては、愛媛県大島産の大島花崗岩を試料として用いた。図 1 1 に、本研究で用いた大島花崗岩の画像を示す。図 1 1 a は花崗岩ブロックの写真、図 1 1 b は偏光顕微鏡を用いて直交ニコル下で撮影した画像である。

一般に花崗岩の物理的・力学的性質には、先在微視き裂の分布の選択的配向性に起因した異方性があることが知られており、しばしば直交異方性を示すことが報告されている²⁴⁾。大島花崗岩の場合にも、先在微視き裂の分布により、「石目」と呼ばれる割れやすい面が存在することが知られている²⁵⁾。大島花崗岩では、「目」と呼ばれる面が最も割れやすい面であり、それに直交する二番目に割れやすい面が「二番」、これらに直交する割れにくい面が「しわ」と呼ばれる²⁵⁾。海外では、「目」「二番」「しわ」に相当する面は、それぞれ「Rift Plane」「Grain Plane」「Hardway Plane」と呼ばれることが多い。本研究では、「しわ」を面 1、「二番」を面 2、「目」を面 3 と呼び、これらの面に垂直な方向を、それぞれ軸 1、軸 2、軸 3 と呼ぶこととする。

本研究で用いた大島花崗岩の岩石ブロックで測定した弾性波速度を表 1 に示す²⁶⁾。この表において、 V_{ii} ($i = 1, 2$ or 3) は軸 i 方向に進む P 波の速度を表し、 V_{ij} ($i \neq j, i, j = 1, 2$ or 3) は軸 i 方向に進行し、軸 j 方向に振動する S 波の速度を表す。この表より、本研究で用いた大島花崗岩では、弾性波速度に異方性が

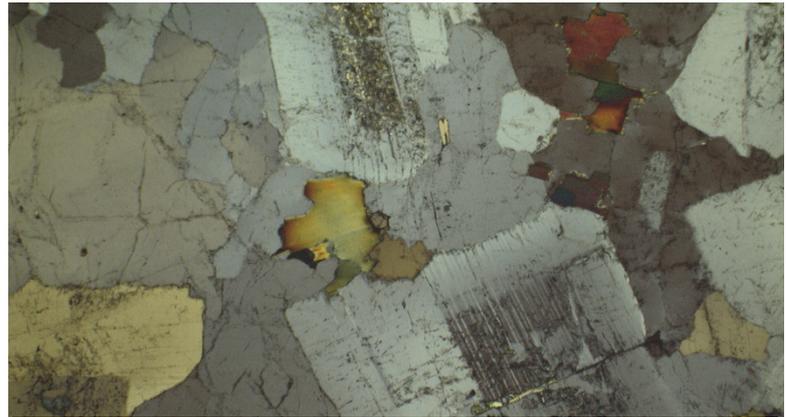
認められることがわかる。すなわち、岩石内部の微視き裂の分布に選択的配向性があるといえる。また、直交異方性材料においては、 $V_{ij} = V_{ji}$ が成立する²⁷⁾。表1より、本研究で用いた大島花崗岩においてもこの関係がほぼ成立していることから、本研究で用いた大島花崗岩は直交異方性材料であるとみなした。

図1 2に、本研究で使用した大島花崗岩のDT試験片の写真を示す。幅45mm、長さ145mm、厚さ3mm、ガイド溝の幅と深さはともに1mm、イニシャルノッチの長さは20mmとしている。

表2に、大島花崗岩の直交異方弾性定数を示す²⁶⁾。この表には、弾性コンプライアンス定数が示されている。これらの値を式(22)および式(36)に用いて、応力拡大係数とき裂進展速度を評価した。



a: 岩石ブロックの写真
(幅・高さともに 30 mm)



b: 偏光顕微鏡画像 (直交ニコル)
(幅 : 1.85 mm, 高さ : 3.43 mm)

図 1 1 大島花崗岩の画像



図 1 2 大島花崗岩の DT 試験片の写真

表1 大島花崗岩における弾性波速度²⁶⁾

	Elastic wave velocity [km/s]								
	V ₁₁	V ₂₂	V ₃₃	V ₂₁	V ₁₂	V ₂₃	V ₃₂	V ₁₃	V ₃₁
Oshima granite	4.91	4.61	4.51	2.91	2.97	2.81	2.82	2.82	2.81

表2 大島花崗岩の弾性コンプライアンス定数²⁶⁾

		Elastic compliance s_{ij} [$\times 10^{-12} \text{Pa}^{-1}$]					
		j					
		1	2	3	4	5	6
i	1	16.7	-3.28	-3.28	0	0	0
	2	-3.28	18.9	-3.28	0	0	0
	3	-3.28	-3.28	19.7	0	0	0
	4	0	0	0	46.0	0	0
	5	0	0	0	0	43.4	0
	6	0	0	0	0	0	42.4

2.7 試験結果

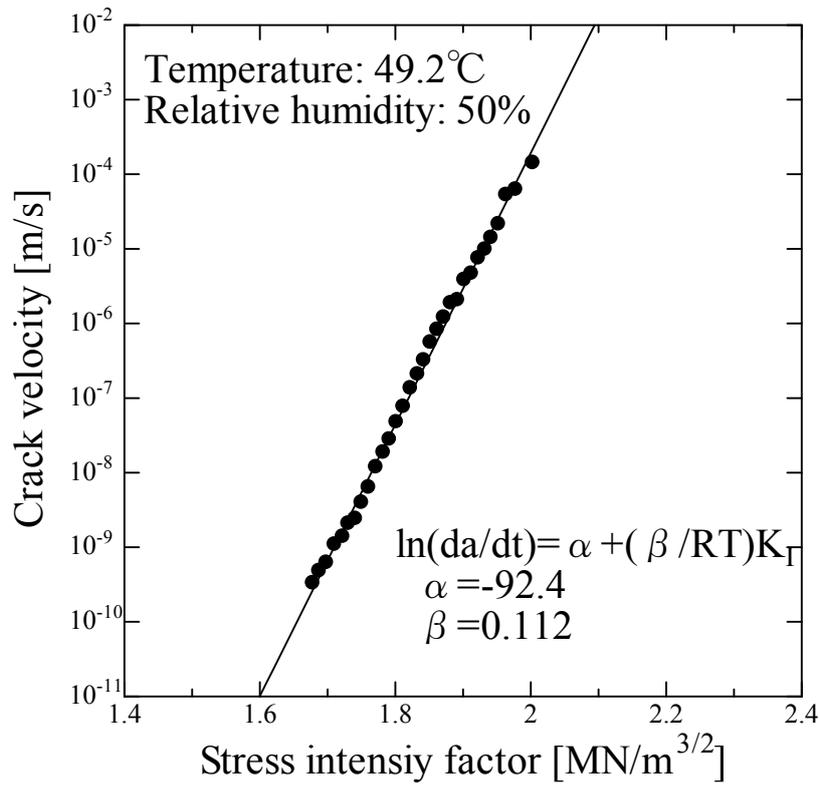
今回は、10日間におよぶ定変位法による計測を行った。図13および図14に、大島花崗岩で得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係を示す。図13は大気中で得られた結果を、図14は水中で得られた結果を示している。また、これらの図において、aおよびbはそれぞれ、式(1)の指数則に基づく片対数グラフでのき裂進展速度と応力拡大係数の関係、または、式(2)の累乗則に基づく両対数グラフでのき裂進展速度と応力拡大係数の関係を示している。また、図13aおよび図14a中に示されている定数は、式(1)を変形して得られる下記の式に示される定数である。

$$\left. \begin{aligned} \ln\left(\frac{da}{dt}\right) &= \alpha + \frac{\beta}{RT} K_1 \\ \alpha &= \ln v_0 - \frac{E^\ddagger}{RT} \end{aligned} \right\} \quad (1')$$

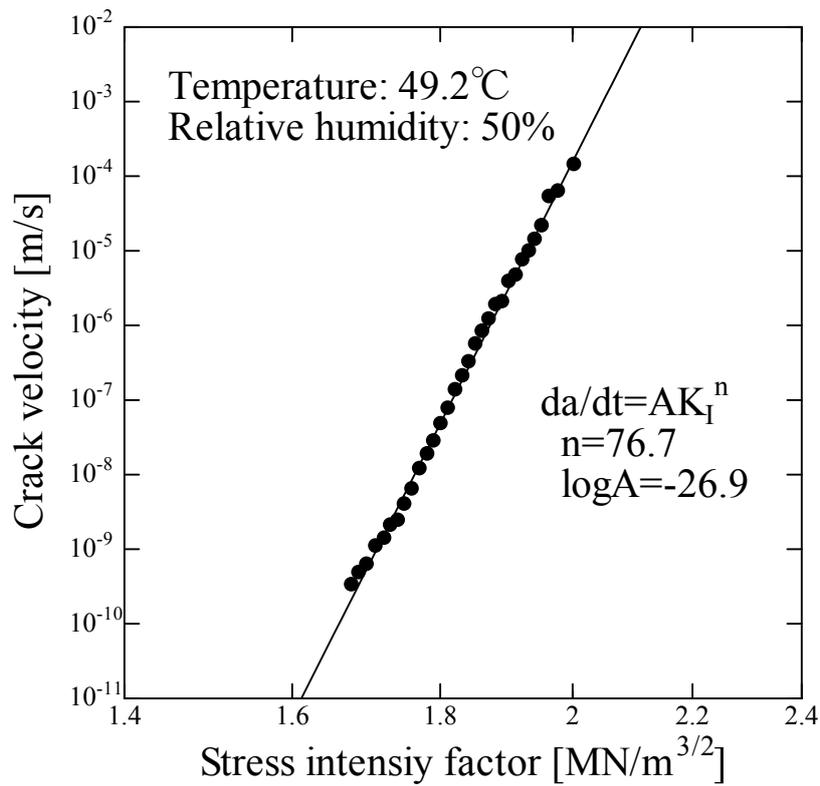
なお、今回の試験では、き裂の進行方向は軸3に平行で、開口方向は軸1方向となるような場合について測定が行われた。この場合、「しわ」「Hardway plane」に沿ってき裂進展が生じることとなる^{24,28)}。

図13および図14より、大島花崗岩では、式(2)で示される関係式が良く成立していることがわかる。また、この図より、 10^{-10} m/s程度のき裂進展速度まで測定できていることがわかる。これは、従来測定されてきたもの ($10^{-2} \sim 10^{-8}$ m/s) よりも低いオーダーのき裂進展速度である。ゆえに、長期間にわたる測定によって、従来のオーダーよりも低いき裂進展速度を測定できることが示された。

図15に、大気中と水中双方で得られたき裂進展速度と応力拡大係数の関係を示す。この図より、水中環境下では、一定の応力拡大係数におけるき裂進展速度が、大気中よりも高くなることがわかる。ゆえに、水がサブクリティカルき裂進展を促進するということが言える。

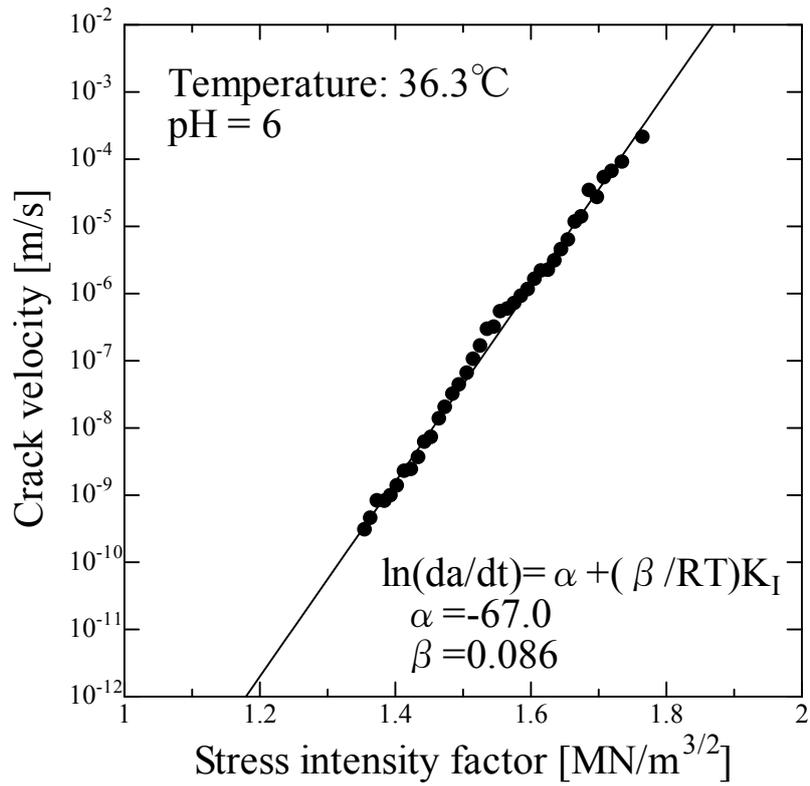


a: 片対数表示

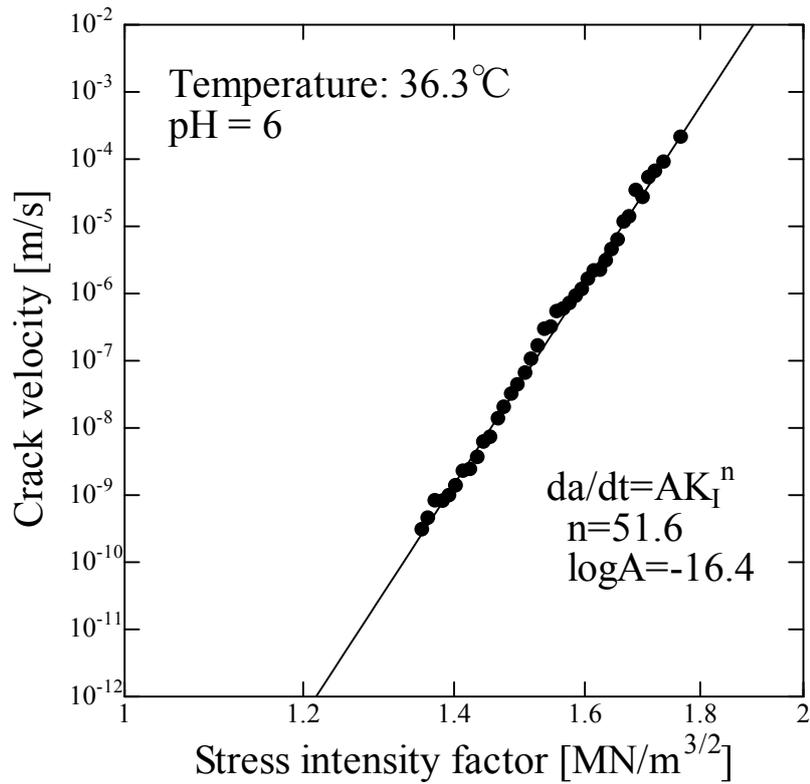


b: 両対数表示

図 1 3 大島花崗岩で得られた大気環境下でのき裂進展速度と応力拡大係数の関係



a: 片対数表示



b: 両対数表示

図 1 4 大島花崗岩で得られた水中環境下でのき裂進展速度と応力拡大係数の関係

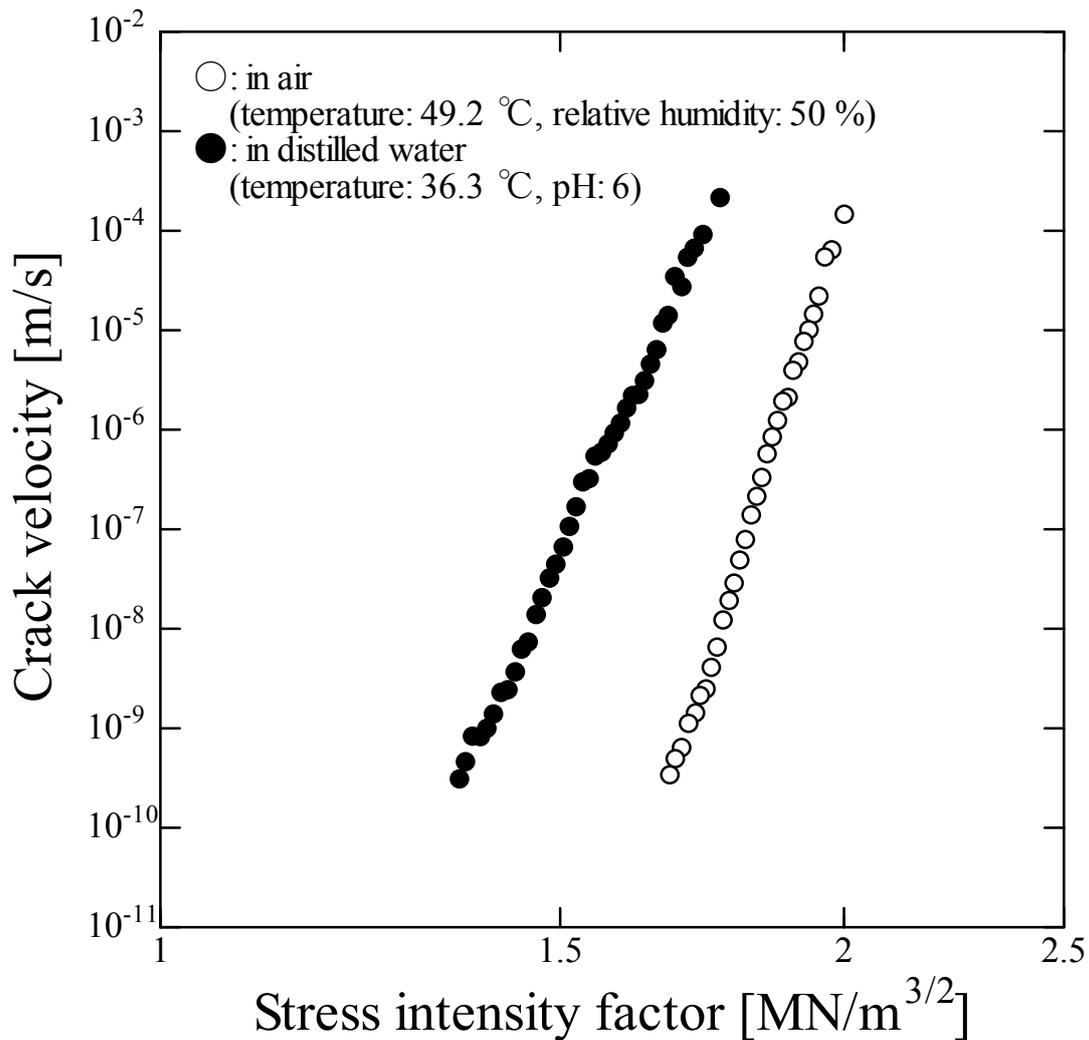


図 1 5 大気中・水中双方の環境下で得られた大島花崗岩でのき裂進展速度と応力拡大係数の関係

2.8 考察

本研究より、大島花崗岩では、 10^{-10} m/s のオーダーのき裂進展速度が測定された。このことから、 10^{-10} m/s オーダーの速度での緩やかなき裂進展が起こるといえる。

サブクリティカルき裂進展の研究で一般に用いられる式(2)で裂進展速度と応力拡大係数の関係をまとめた場合、サブクリティカルき裂進展指数 n の値は、大気中では 76.7 となった。この値は、Nara & Kaneko²⁴⁾で、き裂進展が「しわ」「Hardway plane」に沿って起こる場合に測定されたときに得られた値とよく一致している。一方、水中環境下でのサブクリティカルき裂進展指数の値は 51.6 と、大気中で得られたものよりも低い値となった。この結果は、Nara et al.²⁹⁾が報告しているもの、すなわち水中環境下で火成岩でのサブクリティカルき裂進展指数が低くなるという傾向とよく一致している。

なお、き裂進展速度と応力拡大係数の関係を示したグラフを見た限り、き裂進展速度の違いによる傾きの違いはほとんど認められない。特に、速度が低い場合でも、傾きの値が大きくなるような部分は認

められない。これは、本研究の条件下で測定されたき裂進展速度の領域では、き裂進展限界は存在しないということを示唆している。

き裂進展限界は、一部の人工材料において認められている。例えば Wiedehorn & Bolz²⁾は、ホウ珪酸ガラスやソーダ石灰ガラスを用いた水中でのサブクリティカルき裂進展計測において、 10^{-8} m/s 以下のき裂進展速度の領域で、き裂進展限界が検出されることを示している。Atkinson¹⁾は、サブクリティカルき裂進展限界は、固体表面への鉱物の析出によるき裂の修復によって、き裂進展が抑制されることによって生じると指摘している。したがって、岩石においてサブクリティカルき裂進展限界を検出するためには、岩石表面に鉱物の析出が生じやすい環境下で、長期にわたって試験を行うことが重要であると考えられる。特に、石英や長石のような岩石に一般的に含まれている鉱物表面において、カルシウム化合物（炭酸カルシウム）の析出が認められていることから³⁰⁾、カルシウム濃度の高い水中環境下において長期にわたって計測を行うことが必要であり、今後の課題であると考えられる。

3. 透水試験

3.1 試験方法の概要

透水試験は材料の水理学的性質を評価するために行う試験であり、その材料の透水性により定水位法、変水位法、フローポンプ法、トランジェントパルス法と四種類の透水試験法が一般に使用されている。定水位法や変水位法は、比較的透水性の良い材料に対して使われる試験法で、試験片内を通る流体の流量を測定することで透水性を評価する。それに対して、フローポンプ法やトランジェントパルス法は透水性の低い材料に用いられる試験法である。本研究では、透水性の低い花崗岩を対象としているためトランジェントパルス法^{31,32)}を採用した。そこで、以下ではトランジェントパルス法について説明する。

トランジェントパルス法は、Brace et al.³¹⁾が高い拘束圧条件下で、花崗岩の透水係数を測定するために提案した透水試験方法である。以来、本手法は難透水性岩石の透水係数を測定するための一つの確立した信頼性のある実験方法となっている³³⁾。トランジェントパルス法の基本的概念は、試験片の両端にそれぞれ圧力貯留槽を設置し、一方の貯留槽（上流側）に瞬時に圧力パルスを与え、試験片両端の差圧の経時変化を測定することにより、試験片の水理学的性質を評価する方法である。

3.2 透水係数の評価原理

トランジェントパルス法を含む主要な透水試験法では、均質等方多孔体における1次元浸透流の水理拡散方程式を基礎式としている。水理拡散方程式は水に関する質量保存の式であり、一般に以下のように書き表される。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (37)$$

ここで、 ζ は間隙流体の体積増分（単位体積のコントロールボリュームに流入した流体の体積）である。 \mathbf{q} , q_i は単位時間に単位断面積を通過する流体の体積（ベクトル量）(m/s)である。 ζ については次式のように表される。

$$\zeta = \frac{\delta V_p - \delta V_f}{V} = S' h \quad (38)$$

ただし、間隙流体が圧縮性の場合、 $\delta V_f = 0$ である。 S' は非拘束比貯留率(1/m)である。また、ダルシーの法則より \mathbf{q} については以下のように表される。

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla h \quad (39)$$

ここで、 h は水理水頭(m)、 \mathbf{K} は透水係数テンソル(2階のテンソル)(m/s)である。したがって、水理拡散方程式は次式のように書き換えられる。

$$S' \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla h) = 0 \quad (40)$$

上式をそのまま1次元浸透流に適用すれば、透水試験法における基礎式が次のように得られる。

$$S' \frac{\partial h}{\partial t} - \mathbf{K} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad (41)$$

この偏微分方程式を次の初期条件と境界条件の下で解くと、トランジェントパルス法の解析解が得ら

れる。初期条件は次式で表される。

$$h(x,0) = 0, \quad 0 < x < l \quad (42)$$

次に、下流側の境界条件は一定容積（一定貯留量）であるので、 h_d を下流側貯留槽内の水頭として、次のように表される。

$$h(0,t) = h_d(t), \quad t \geq 0 \quad (43)$$

$$\frac{S_d}{KA} \frac{dh_d}{dt} - \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=0} = 0, \quad t > 0 \quad (44)$$

$$h_d(0) = 0 \quad (45)$$

ここで、 S_d は下流側貯留槽の圧縮貯留量を表している。上流側の境界条件も一定容積であるので、

$$h(l,t) = h_u(t), \quad t \geq 0 \quad (46)$$

$$\frac{S_u}{KA} \frac{\partial h_u}{\partial t} + \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)_{x=l} = 0, \quad t > 0 \quad (47)$$

$$h_u(0) = H \quad (48)$$

と表される。ここで、 h_u は上流側貯留槽内の水頭を、 S_u は上流側貯留槽の圧縮貯留量を表している。 H は実験開始直後の供試体両端間の水頭差（パルス水頭）である。

式(42)の初期条件と式(43)～(48)の境界条件の下で偏微分方程式(41)を解くと、トランジェントパルス法の解析解が次式のように求まる³²⁾。

$$\frac{h(x,t)}{H} = \frac{1}{1+\beta+\gamma} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\exp\left(-\alpha\phi_m^2\right) \left[\cos\phi_m\xi - \frac{\gamma\phi_m}{\beta} \sin(\phi_m\xi) \right]}{\left(1+\beta+\gamma - \frac{\gamma\phi_m^2}{\beta}\right) \cos\phi_m - \phi_m \left(1+\gamma + \frac{2\gamma}{\beta}\right) \sin\phi_m} \quad (49)$$

ここで、 $\xi = x/l$ 、 $\alpha = Kt/l^2 S'$ 、 $\beta = S'Al/a$ 、 $\gamma = S_d/S_u$ であり、それぞれ、 ξ は供試体内の無次元位置、 α は無次元時間、 β は装置の圧縮貯留量に対する供試体の圧縮貯留量の比、 γ は上流側貯留槽の圧縮貯留量に対する下流側貯留槽の圧縮貯留量の比である。また、 ϕ_m は次の非線形方程式の根である。

$$\tan\phi = \frac{\phi(\gamma+1)}{\frac{\gamma\phi^2}{\beta} - \beta} \quad (50)$$

なお、トランジェントパルス法を提案した Brace et al.³¹⁾は、供試体自体の圧縮貯留量が貯留槽の圧縮貯留量に比べて無視できるくらい小さい場合、すなわち $\beta \approx 0$ のときに有効な近似解を次式のように導出している。

$$\frac{h_u(t) - h_f}{H} = \frac{V_d}{V_u + V_d} \exp\left\{-\frac{KAt}{\rho\lambda l} \left(\frac{1}{V_u} + \frac{1}{V_d}\right)\right\} \quad (51)$$

ここで、 h_f は上流側と下流側の水頭が等しくなった（平衡に達した）ときの値であり、 V_u と V_d はそれぞれ上流側と下流側の貯留槽の容積、 ρ と λ はそれぞれ間隙流体の密度と圧縮率である。上式を用いて、水頭差の経時変化を表すと次式となる。

$$\frac{\Delta h(t)}{H} = \frac{h_u(t) - h_d(t)}{H} = \exp\left\{-\frac{KAt}{l} \left(\frac{1}{S_u} + \frac{1}{S_d}\right)\right\} \quad (52)$$

したがって、透水試験で得られた水頭差のデータを片対数プロットしてその傾きを求めることにより、上式を使って供試体の透水係数を評価することができる。

3.3 試験装置

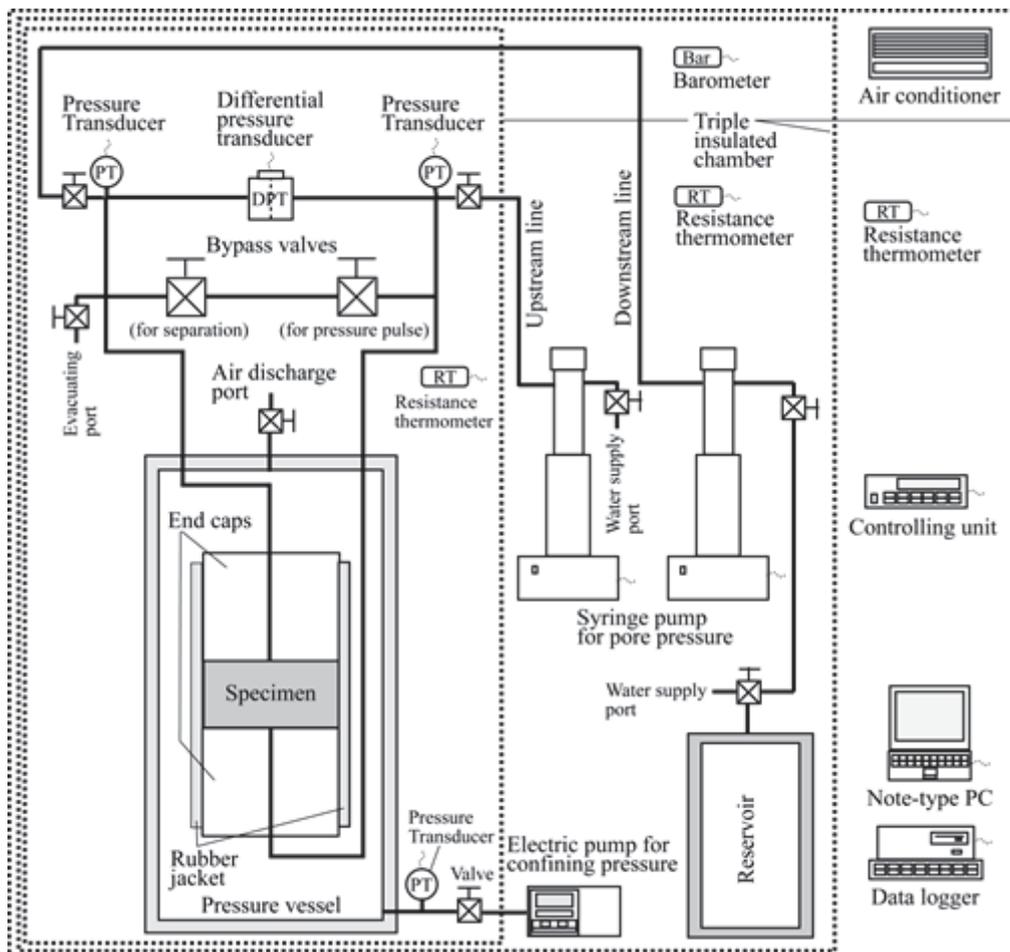
トランジェントパルス試験装置を図16に示す。図16aは装置の概要図、図16bは装置の写真である。この装置は大きく分けて、間隙流体系、拘束流体系、制御・記録系および独立した温度制御系から構成されている。

拘束流体系には、試験片を設置する圧力容器、加圧用ポンプ、配管類が含まれる。今回使用した小型圧力容器は10MPaまでの静水圧に耐えられる。配管類は、高圧条件下における水漏れを避けるため、超高圧用のチューブやバルブを使用している。また、加圧用ポンプとしてはダブルプランジャーポンプを利用している。

間隙流体系は、貯留槽、間隙流体供給・圧力制御用シリンジポンプ、セパレート用バルブおよび圧力パルス用バルブを含む配管類から成る。間隙水を供給し、間隙水圧を設定するために、上流側と下流側それぞれにシリンジポンプを接続している。シリンジポンプは、一定圧力あるいは一定流量で流体流動を制御可能であり、流量に関しては50mL/minから0.01 μ L/minの範囲を $\pm 3\%$ の精度で、圧力に関しては1kPaの分解能で、最高で69MPaまで制御できる。透水試験に際しては、シリンジポンプのシリンダーが貯留槽の役割を担う。下流側の圧力を安定させるために、下流側シリンジポンプに追加の貯留槽も接続されている。この貯留槽は必要に応じて使用可能であり、その容積は850mLである。配管類は、高圧条件下における水漏れを避けるため、超高圧用のチューブやバルブを使用している。

制御・記録系には、データロガーとシリンジポンプ用コントローラーおよび各種計測計（差圧計、圧力計、温度計）が含まれる。圧力計は差圧計も含めて7箇所で使用されている。拘束圧、上流側および下流側配管内の間隙水圧、2台のシリンジポンプ内の圧力、気圧、そして上下流配管の差圧が計測されている。差圧計は高線形性を有し、本実験で重要となる試験片の両端の圧力差を計測するために使われる。また、シリンジポンプ内蔵の圧力計は、配管内の圧力を計測するために使われ、配管の水漏れをチェックする時にも使われる。

独立した温度制御系は、エアコンと3つの側温抵抗体から成る。差圧計は温度変化に対して敏感であるので、試験装置は三重の断熱室内に設置した。断熱室は図14aからわかるように、三重構造になっている。差圧は温度変化に敏感に反応するので、トランジェントパルス試験では試験中の温度変化をなるべく小さくする必要がある。圧力容器や計測器の一部は一番内側の断熱室の中に設置されておりそこに熱源となるものは置いていない。一番外側の断熱室内の温度はエアコンで調整されている。これらの結果として、圧力容器周辺の温度変化は、試験中は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下に抑えられている。



a: 装置の概要図



b: 装置の写真

図 1 6 透水試験（トランジェントパルス試験）装置

3.4 試験手順

本研究におけるトランジェントパルス透水試験は、次のような手順で行われた。

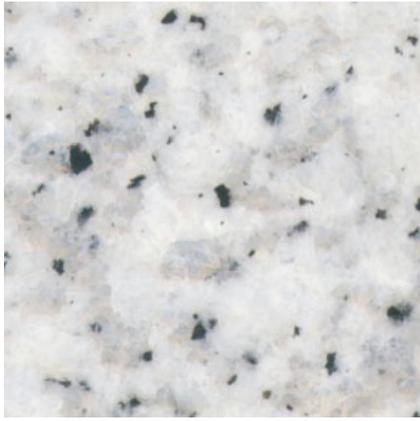
- (1) 岩石試験片を水で飽和させる。ここでは、岩石をデシケーター内に蒸留水とともに保存し、真空ポンプでデシケーター内を真空状態にして、1週間以上保存した。
- (2) 試験片を2つの間隙水供給用のエンドピースの間にはさみ、熱収縮チューブで側面を覆うことによって、間隙水以外との遮断を行う。それを固定円盤にはさみ、圧力容器の上蓋の裏側（内側）に設置し、封圧媒体（本研究では水）で満たされている圧力容器内に収める。
- (3) ダブルプランジャーポンプで封圧を1MPa程度まで上げ、バルブを閉じて、それを一定に維持する。
- (4) 真空ポンプを使い、配管や貯留槽内を脱気する。
- (5) シリンジポンプを使って、間隙水を供給し間隙水圧を500kPa程度まで上げる。
- (6) 断熱室内の温度変化や一定圧力で動作させているシリンジポンプの流量をモニタリングする。これにより、室温の安定化を図ると同時に水漏れのチェックをする。先述した温度制御を達成するまでには、この状態で数日を要する。また水漏れを発見した場合には、バルブ等の閉め具合を確認し、漏れがなくなるまで監視を続ける。
- (7) 室温の変化と水漏れに関して問題がないと判断した時点で、ポンプを操作し封圧と間隙水圧を所定の値に設定する。今回の実験では、封圧を3MPa、間隙水圧を1MPaとした。
- (8) 静かにセパレートバルブ（上流側と下流側を切り離すバルブ）を閉じる。このとき、もし前段階で発見できなかった微小な水漏れが起こっていた場合には、それが差圧の変化に表れることになる。この場合、(5)の手順に戻り、再度操作を実施する。なおセパレートバルブを閉じた後に試験片内の水頭分布が一樣となるには、試験片の透水性にもよるが、数時間以上必要である。
- (9) 差圧の変動が見られなくなっていれば、所定のパルス圧力を上流側に負荷する。差圧が、パルスをかける前の状態に戻ったときに実験終了とする。今回は、パルス圧としておおよそ90kPaと50kPaの2回の実験を行った。

3.5 岩石試料

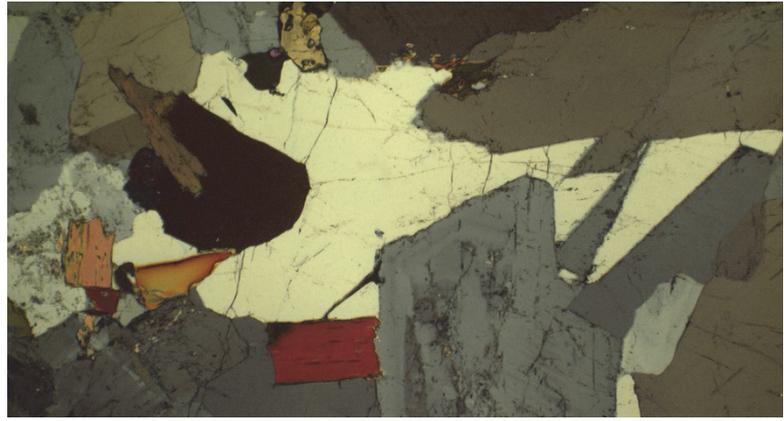
本年度の透水試験においては、茨城県笠間市産の稲田花崗岩を試料として用いた。図17に、本研究で用いた稲田花崗岩の画像を示す。図17aは花崗岩ブロックの写真、図17bは偏光顕微鏡を用いて直交ニコル下で撮影した画像である。

前述したように、花崗岩の物理的・力学的性質には、先在微視き裂の分布の選択的配向性に起因した異方性があり、稲田花崗岩の場合にもき裂分布に起因した異方性が報告されている³⁴⁾。稲田花崗岩の採石場でも、割れやすい方向に関して固有の名称がつけられており、鉛直方向の最も割れやすい面が「目」、それに直交する鉛直方向の面が「二番」、これらに直交する水平方向の面が「重ね」と呼ばれる³⁵⁾。今回は、「二番」に垂直な方向から円柱形試験片を用意し、それを透水試験に用いることとした。

図18に、本研究で使用した稲田花崗岩の透水試験片の写真を示す。直径50mm、長さ25mmの円柱形の試験片を用いた。円柱の軸方向に水が流れるように透水試験を実施した。



a: 岩石ブロックの写真
(幅・高さともに 30 mm)



b: 偏光顕微鏡画像 (直交ニコル)
(幅 : 1.85 mm, 高さ : 3.43 mm)

図 1 7 稲田花崗岩の画像



図 1 8 稲田花崗岩の透水試験片の写真

3.6 試験結果

稲田花崗岩を供試体として実施したトランジェントパルス法による透水試験の結果を以下に示す。まず、Brace et al.³¹⁾ の近似解 (式(52)) に基づき、無次元化した水頭差の片対数プロットに対して近似直線を引き、その傾きから透水係数を求めた (図 1 9)。ここでは、直線性を示す 500s までのデータを用いている。

図 1 9 と同じ実験データに対して、無次元化した水頭差の減衰曲線に対して非線形最小二乗法を用いて Brace et al.³¹⁾ の解 (式(52)) をフィッティングした結果を図 2 0 に示す。

図 2 0 と同様に、同じ実験データに対して、今度は Hsieh et al. (1981) の解析解 (式(49)) をフィッティングした結果を図 2 1 に示す。

表 2 に透水試験の結果をまとめる。これらの解析から得られた稲田花崗岩の透水係数は、封圧 3MPa、間隙圧 1MPa で、パルス圧が 90kPa のときは $3.09\sim 3.45\times 10^{-11}$ m/s であり、パルス圧が 50kPa のときは $2.90\sim 3.05\times 10^{-11}$ m/s であった。

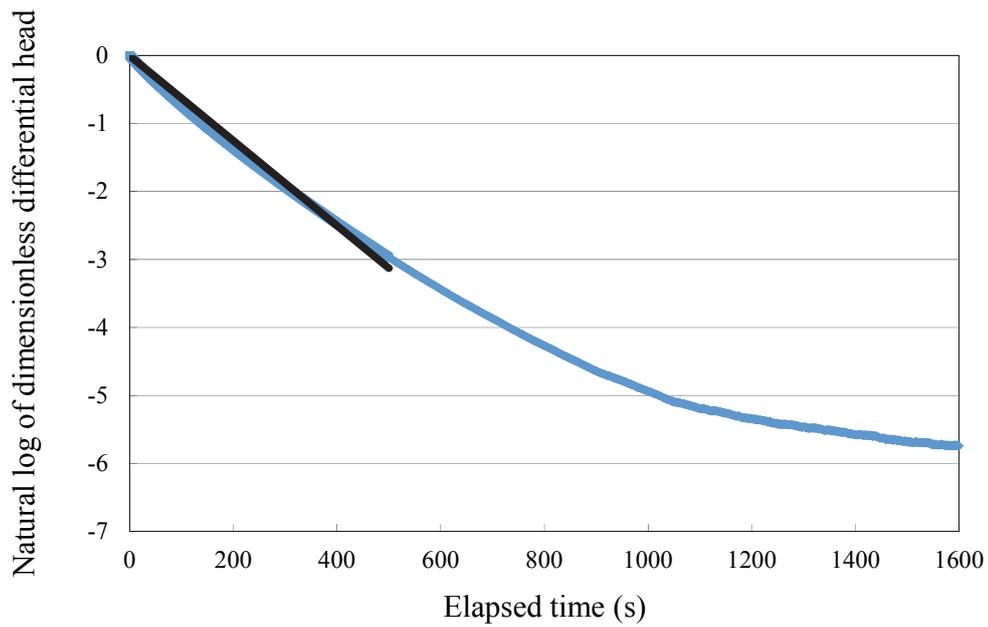


図 1 9 透水試験結果（封圧 3MPa、間隙圧 1MPa、パルス圧 90kPa を与えた場合。青色の曲線が計測結果、黒色の直線が Brace et al.³¹⁾の解の理論直線を表す。）

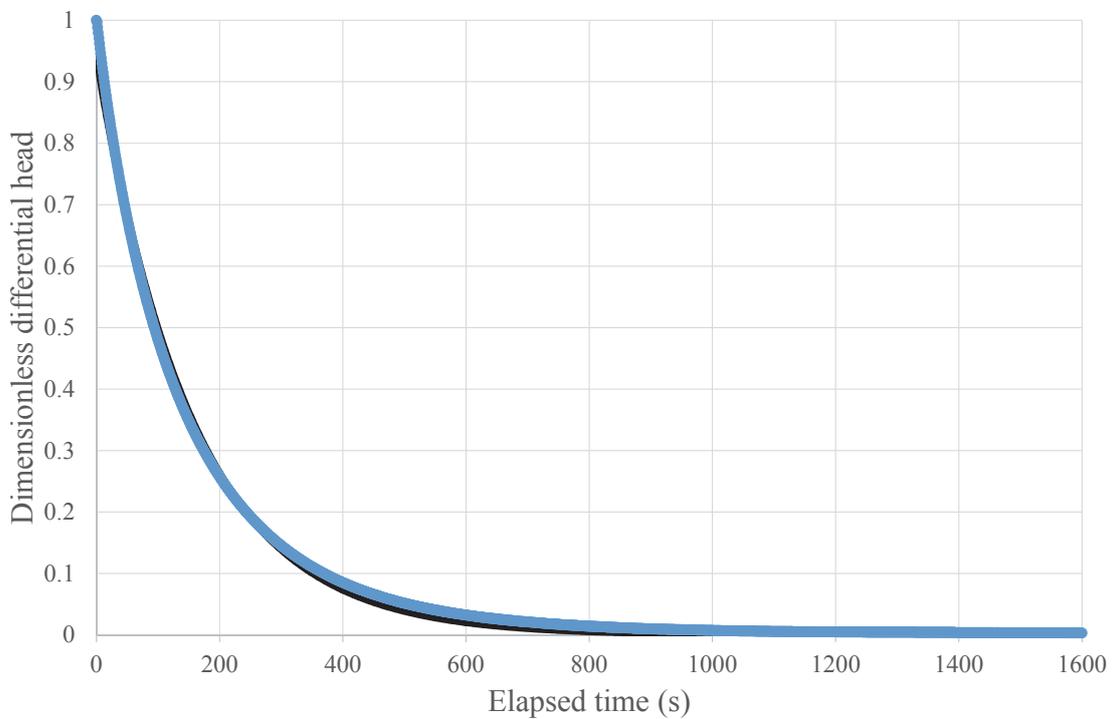


図 2 0 透水試験結果（封圧 3MPa、間隙圧 1MPa、パルス圧 90kPa を与えた場合。青色の曲線が計測結果、黒色の曲線が Brace et al.³¹⁾の解の理論曲線を表す。）

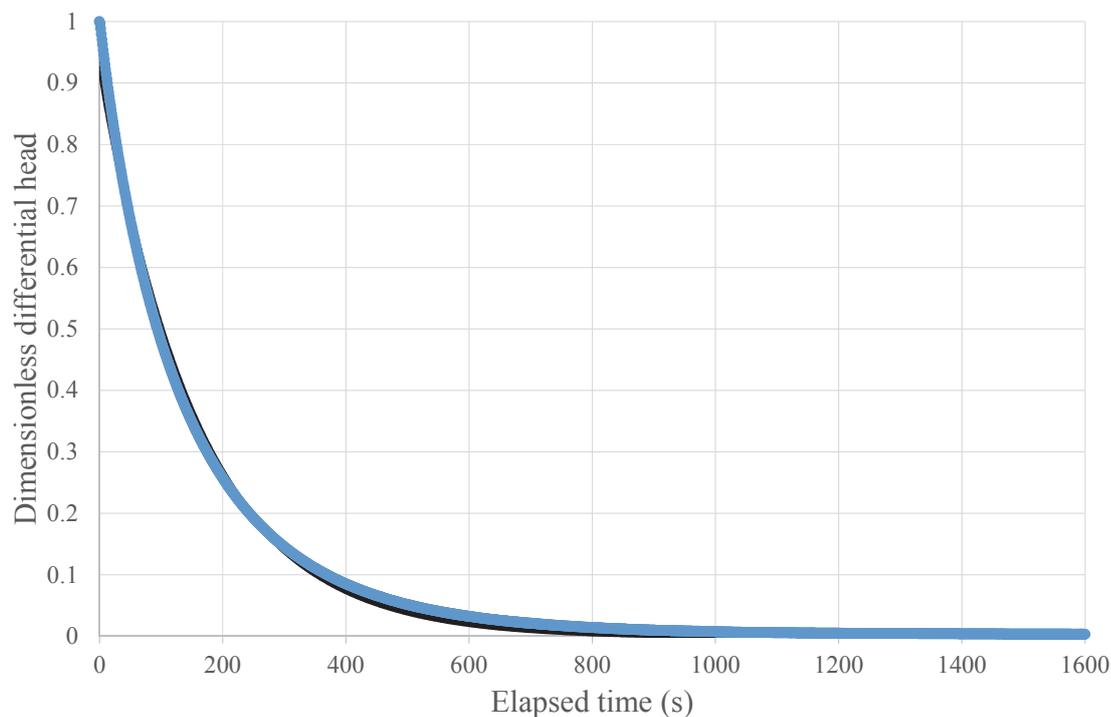


図 2 1 透水試験結果（封圧 3MPa、間隙圧 1MPa、パルス圧 90kPa を与えた場合。青色の曲線が計測結果、黒色の曲線が Hsieh et al.³²⁾の厳密解の理論曲線を表す）

表 3 透水試験の結果のまとめ

試験番号	封圧 [MPa]	間隙水圧 [MPa]	有効封圧 [MPa]	パルス圧 [kPa]	透水係数 [m/s]	用いた解	近似法
1	2.94	0.94	2.00	88	3.09×10^{-11}	Brace et al. ³¹⁾	線形近似
	2.94	0.94	2.00	88	3.45×10^{-11}	Brace et al. ³¹⁾	非線形最小二乗
	2.94	0.94	2.00	88	3.43×10^{-11}	Hsieh et al. ³²⁾	非線形最小二乗
2	2.94	0.95	1.99	48	2.90×10^{-11}	Brace et al. ³¹⁾	線形近似
	2.94	0.95	1.99	48	3.05×10^{-11}	Brace et al. ³¹⁾	非線形最小二乗
	2.94	0.95	1.99	48	3.04×10^{-11}	Hsieh et al. ³²⁾	非線形最小二乗

3.7 考察

花崗岩は、代表的な硬岩として、工学的利用価値が極めて高い岩石である。放射性廃棄物処分を考える上では、岩盤は天然バリアとして高い遮蔽性（低い透水性）が求められ、また高い力学的安定性（高い長期強度）が求められる。フィンランドやスウェーデンに分布する花崗岩体は、先カンブリア代に生成されたものであり、岩石内に含まれるき裂の密度が低いことが一般的に知られている。固体内では、

き裂や空隙のネットワークが水の流路となるため⁶⁾、き裂密度が低い岩石では、透水性は低くなる³⁶⁾。フィンランドやスウェーデンに分布する花崗岩体はき裂密度が低いことから、天然バリアとしての高い遮蔽性が期待でき、実際にフィンランドでは処分場が決定している³⁷⁾。

一方、日本の花崗岩の場合、北欧の花崗岩よりもはるかにき裂密度が高いことが知られている³⁸⁾。また、地下空洞の建設や坑道を掘削する際に、周辺岩盤には、き裂密度が高い掘削影響領域 (Excavated Damaged Zone (EDZ)) が形成される。したがって、花崗岩のような緻密な岩石の場合でも、き裂密度によっては高い遮蔽性を実現できないこともありうる。ゆえに、日本の花崗岩における遮蔽性能の理解のためには、花崗岩を用いて透水試験を行い、先行研究と比較することが極めて重要であるといえる。

これまでに、様々な研究者によって花崗岩での透水試験が行われている。例えば、稲田花崗岩の透水係数は $10^{-10} \sim 10^{-12} \text{m/s}$ のオーダーと報告されている³⁹⁻⁴¹⁾。また、Nara et al.⁴²⁾によって大島花崗岩で得られた透水係数 (10^{-11}m/s のオーダー) ともよく一致している。したがって、今回の実験で得られた稲田花崗岩の透水係数は、これまでに報告されている花崗岩の透水試験の結果と同程度の値といえる。このことから、本研究で用いた試験装置は良好に作動していると考えられる。

日本のような変動帯の地下環境で放射性廃棄物処分を行うことを考える上では、き裂が多く含まれ、かつそこにカルサイトのようなカルシウム化合物からなる析出物が充填されている状況や、粘土鉱物が介在する条件下で試験を行い、バリア性能を評価することが重要であると考えられる。ゆえに、今後は断層や節理のような不連続面にカルシウム化合物からなる析出物や粘土が充填されているような試料を用意して試験を行うことが重要であると思われる。これについては今後の課題としたい。

4. 結論

本研究では、岩石内の節理や断層の遮蔽性（バリア性能）を、ダブルトーション試験法による破壊力学試験と透水試験を用いて調べる。平成 26 年度は、初年度として、破壊力学および透水試験を行う環境を整備し、予備試験を実施することとし、特に次のことを検討項目とした。

- 1) 破壊力学試験法である定変位ダブルトーション試験法による測定を、予備実験として 10 日間連続で行うことにより、長期連続測定によるき裂進展データ取得環境の整備を実施する。
- 2) トランジェントパルス法による透水試験の予備実験を行うことにより、岩石の遮蔽性（バリア性能）に関するデータ取得環境の整備を実施する。

1) については、ダブルトーション試験装置を恒温恒湿器内に組み立てることによって、長期間周辺環境を一定に保てる破壊力学試験装置を準備した。さらに、応力拡大係数とき裂進展速度のデータを長期間にわたって取得できるようにするため、データ取得間隔を長期にわたって制御できるデータロガーとデータ取得用のパソコンを試験装置に接続することによって、長期間連続して行うダブルトーション試験を行えるようにした。その上で、大島花崗岩を試料として予備試験を行った。その結果、10 日間の連続測定を無事に行えることを確認し、応力拡大係数とき裂進展速度の関係を得られることを確認した。

2) については、花崗岩を試料として、トランジェントパルス法による透水試験の予備試験を行った。その結果、従来得られてきた透水係数と同程度のものが得られ、試験装置が問題なく作動し、岩石の透水係数に関するデータが得られることを確認した。

ダブルトーション法を用いた破壊力学試験では、従来よりも低いき裂進展速度の測定に成功した。ただし、き裂進展限界の検出には至らなかった。き裂進展限界の検出には、極めて低いき裂進展速度を測定するとともに、き裂修復が起りやすい環境で長期間にわたって試験を行う必要がある。ゆえに、極めて高い精度の試験計測が要求される。この目的を達成するためには、今後き裂修復が起りやすい環境下で長期間試験をするような工夫をすることが課題であると考えられる。

また、透水試験では、断層や節理のような不連続面を含む試料で透水係数を測定できておらず、今後の課題といえる。今後は不連続面を含む試料を準備し、透水試験を行う必要があると考えられる。また、天然系のき裂および断層粘土を含む試料を準備することによって、実際の断層が有する遮蔽性能を調べることも今後の課題の一つである。

謝辞

本研究の遂行に当たり、北海道大学大学院工学研究科・佐藤努教授には多くの有用なアドバイスをいただきました。また、独立行政法人日本原子力研究開発機構より、現場における岩石や粘土の試料および遮蔽性能に関する情報をいただきました。株式会社ニチカより、岩石試験片の整形に関してご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Atkinson, B.K., 1984. Subcritical crack growth in geological materials. *J. Geophys. Res.*, **89**, 4077-4114.
- 2) Wiederhorn, S.M. & Bolz, L.H., 1970. Stress corrosion and static fatigue of glass. *J. Am. Ceram. Soc.*, **53**, 543-548.
- 3) Charles, R.J., 1958. Static fatigue of glass. II. *J. Appl. Phys.*, **29**, 1554-1560.
- 4) Atkinson, B.K. & Meredith, P.G., 1987. The theory of subcritical crack growth with applications to minerals and rocks. in *Fracture Mechanics of Rock*. Academic Press, London, pp.111-166.
- 5) 奈良禎太, 2007. 岩石のサブクリティカル亀裂進展に関する既往の研究と新たな展開—亀裂進展の時間依存性挙動の把握を目指して—, *Journal of MMIJ*, **123**, 2-9.
- 6) Gueguen, Y. & Dienes, J., 1989. Transport properties of rocks from statistics and percolation. *Math. Geol.*, **21**, 1-13.
- 7) Fujii, Y., Ishijima, Y., Ichihara, Y., Kiyama, T., Kumakura, S., Takada, M., Sugawara, T., Narita, T., Kodama, J., Sawada, M., Nakata, E., 2011. Mechanical properties of abandoned and closed roadways in the Kushiro Coal Mine, Japan. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **48**, 585-596.
- 8) Nara, Y., Morimoto, K., Hiroyoshi, N., Yoneda, T., Kaneko, K. & Benson, P. M., 2012. Influence of relative humidity on fracture toughness of rock: Implications for subcritical crack growth. *Int. J. Solids Struct.*, **49**, 2471-2481.
- 9) Nara, Y., Meredith, P.G. & Mitchell, T., 2013. Influence of macro-fractures and fault gouge on permeability in basalt, Proc. EGU General Assembly, Paper No. EGU2013-1493, Vienna, Austria, May 2013.
- 10) Nakao, A., Nara, Y., Kashiwaya, K., Ishida, T. & H. Ogawa, 2014. Observation of mineral precipitation on rock surface, Proc. 8th Asian Rock Mechanics Symposium, Paper No.91, Sapporo, Japan, October 2014.
- 11) Kies, J.A. & Clark, A.B.J., 1969. Fracture propagation rates and times to fail following proof stress in bulk glass, in *Fracture 1969*, Chapman and Hall, London, pp.483-491.
- 12) Williams, D.P. & Evans, A.G., 1973. A simple method for studying slow crack growth. *J. Test. Eval.*, **1**, 264-270.
- 13) Sano, O. & Kudo, Y., 1992. Relation of fracture resistance to fabric for granitic rocks. *Pure Appl. Geophys.*, **138**, 657-677.
- 14) Timoshenko, S.P. & Goodier, J.N., 1982. *Theory of Elasticity* - Third Edition, McGraw-Hill, Auckland.
- 15) 岡村弘之, 1976. 線形破壊力学入門, 培風館, 東京.
- 16) Lekhnitskii, S.G., 1968. *Anisotropic Plate*, Gordon and Breach, New York.
- 17) Paris, P. C. & Sih, G. C., 1965. Stress analysis of cracks, ASTM STP 381, pp.30-83.
- 18) Evans, A.G., 1972. A method for evaluating the time-dependent failure characteristics of brittle materials - and its application to polycrystalline alumina. *J. Mater. Sci.*, **7**, 1137-1146.
- 19) Atkinson, B.K., 1979. A fracture mechanics study of subcritical tensile cracking of quartz in wet environments. *Pure Appl. Geophys.* **117**, 1011-1024.
- 20) Pletka, B.J., Fuller, E.R. Jr., & Koepke, B.G., 1979, An evaluation of Double-Torsion testing - Experimental, ASTM STP 678, pp.19-37.
- 21) Nara, Y., Nakabayashi, R., Maruyama, M., Hiroyoshi, N., Yoneda, T. & Kaneko, K., 2014. Influences of

- electrolyte concentration on subcritical crack growth in sandstone in water, *Eng. Geol.*, **179**, 41-49.
- 22) Nara, Y. & Kaneko, K., 2005. Study of subcritical crack growth in andesite using the Double Torsion test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **42**, 521-530.
- 23) Trantina, G.G., 1977. Stress analysis of the Double-Torsion specimen, *J. Am. Ceram. Soc.*, **60**, 338-341.
- 24) Nara, Y. & Kaneko, K., 2006. Sub-critical crack growth in anisotropic rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **43**, 437-453.
- 25) 工藤洋三, 佐野修, 1993. 石目と花崗岩の力学的性質, *地質ニュース*, **470**, 36-45.
- 26) 奈良禎太, 金子勝比古, 2003. 花崗岩の異方弾性定数の評価法に関する研究, *Journal of MMIJ*, **119**, 396-402.
- 27) Hearmon, R.F.S., 1961. *An Introduction to Applied Anisotropic Elasticity*, Oxford University Press, London.
- 28) Nara, Y., Koike, K., Yoneda, T. & Kaneko, K., 2006. Relation between subcritical crack growth behavior and crack paths in granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **43**, 1256-1261.
- 29) Nara, Y., Yamanaka, H., Oe, Y. & Kaneko, K., 2013. Influence of temperature and water on subcritical crack growth parameters and long-term strength for igneous rocks. *Geophys. J. Int.*, **193**, 47-60.
- 30) Fukuda, D., Maruyama, M., Nara, Y., Hayashi, D., Ogawa, H. & Kaneko, K., 2014. Observation of fracture sealing in high-strength and ultra-low-permeability concrete by micro-focus X-ray CT and SEM/EDX, *Int. J. Fract.*, **188**, 159-171.
- 31) Brace, W.F., Walsh, J.B. & Frangos, W.T., 1968. Permeability of Granite under High Pressure, *J. Geophys. Res.*, **73**, 2225-2236.
- 32) Hsieh, P.A., Tracy, J.V., Neuzil, C.E., Bredehoeft, J.D., & Sillman, S.E., 1981. A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks – I. theory, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18**, 245-252.
- 33) 加藤昌治, 高橋学, 金子勝比古, 2013. トランジェントパルス法を用いた低透水性岩石の水理定数の高精度評価, *Journal of MMIJ*, **129**, 472-478.
- 34) 加藤昌治, 小池克明, 米田哲朗, 金子勝比古, 1998. 岩石内マイクロクラックの3次元方位分布の定量評価法, *Journal of MMIJ*, **114**, 909-917.
- 35) 笹田政克, 1991. 稲田みかげ, *地質ニュース*, **441**, 34-40.
- 36) Nara, Y., Meredith, P.G., Yoneda, T. & Kaneko, K., 2011. Influence of macro-fractures and micro-fractures on permeability and elastic wave velocities in basalt at elevated pressure, *Tectonophysics*, **503**, 52-59.
- 37) 資源エネルギー庁, 2014. 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について (2014年度版) .
- 38) 吉田英一, 2012. 地層処分—脱原発後に残される科学課題—, 近未来社, 名古屋.
- 39) 高橋学, 平田実雄, 小出仁, 1990. 稲田花崗岩の透水係数に及ぼす封圧および感激水圧の影響について, *応用地質*, **31**, 105-114.
- 40) 林為人, 高橋学, 1999. 高温履歴を有する稲田花崗岩の透水係数と等価管路モデルに基づく評価, *応用地質*, **40**, 25-35.
- 41) Zhang, M., Takahashi, M., Morin, R.H. & Esaki, T., 2000. Evaluation and application of the transient-pulse technique for determining the hydraulic properties of low-permeability rocks – Part 2: experimental application, *Geotech. Test. J.*, **23**, 91-99.

- 42) Nara, Y., Meredith, P.G., Nakabayashi, R., Yoneda, T. & Kaneko, K., 2012. Influence of pores, fractures and pressure on permeability and elastic wave velocities in rock, Proc. 7th Asian Rock Mechanics Symposium, pp.202-209, Seoul, Korea, Oct. 15-19, 2012.

研究報告 3

天然バリアと人工バリアの力学特性を考慮した
放射性廃棄物処分施設の長期的な力学挙動予測
システムの開発

(処分施設の建設～操業～閉鎖～)

福島工業高等専門学校 建設環境工学科

金澤 伸一

1. 研究背景

これまで我が国では、他国に依存しないエネルギー保有の観点から原子力発電が重要視されてきた。原子力発電では放射性廃棄物の生成が避けられず、その放射性廃棄物の処分方法として地中に埋設して処分する放射性廃棄物地層処分が検討されていたが、2011年3月11日の東日本大震災を受けて、放射性廃棄物の処分方法の確立が急務となっている。

現在、地層処分施設の長期予測解析において、人工バリア（以下、ベントナイト緩衝材）の再冠水時の不飽和状態での膨潤挙動と、その後の飽和時の圧密などの挙動は別々に検討され、連続的に解いたものは著者の知る限り見当たらない。さらに、天然バリア（以下、岩盤）とベントナイト緩衝材の相互関係の力学挙動を解いたものも見当たらない。しかしながら近年では、個々の事象の予測技術が開発・高度化され、岩盤を含めた処分施設の建設から超長期にわたる挙動を連続的に解析できるところまできている。

そこで本研究では、施設の建設から閉鎖～に着目し、岩盤とベントナイト緩衝材の力学特性を考慮できるモデルを組み込んだ、熱／固相／液相／気相連成有限要素解析を実施し、建設から供用までの力学挙動を連続して解くことで、岩盤とベントナイト緩衝材の長期的（数十万年オーダー）な力学的相互作用を把握する。さらに、解析条件の選定や解析結果の評価方法までの一連の流れを整備し、処分施設の長期的力学挙動の予測システムを開発する。

2. 研究目的

本年度は、ベントナイトに関する温度変化の影響を考慮した膨潤量・膨潤圧試験、温度変化を考慮した圧密試験、温度変化による一軸強度試験のデータを取得する環境を整備し、予備試験を実施する。さらに、解析シミュレータの開発と高度化を実施する。

1) 圧密試験機、一軸試験機を用いた室内実験装置の整備

吸水過程でのベントナイト膨潤量、膨潤圧の計測のため、圧密試験機を改良する。また同様に、温度変化を考慮したベントナイトの圧密試験を実施する。さらに温度変化によるベントナイトの一軸強度を計測するため、高強度まで計測できる一軸試験機に改良し、予備試験および各種データ取得環境の整備を実施する。ただし、本年度は試験機の開発のみで試験環境を整えた。

2) 解析シミュレータの開発・高度化

申請らが保有している2次元の有限要素解析コードに、コンプライアンス可変型構成モデル¹⁾を組み込む。

3) 地層処分施設の長期挙動の解析条件の整備

組み込んだモデルのパラメータの選定を行う。パラメータの選定には、岐阜県瑞浪市の花崗岩に対して実施されてきた室内試験の実験データを利用する。また、第2次 TRU レポートや地層処分研究開発第2次取りまとめ等を参考に、解析対象とする処分施設の形状や人工バリアの解析パラメータの選定を行う。その際、TRU 処分施設や高レベル放射性廃棄物処分施設などの複数の解析対象を設定する。

3. 本年度の実施内容

1) 温度変化を考慮した圧密特性の把握

放射性廃棄物地層処分では、廃棄体をガラス固化体に封じ込め、さらにその周囲を緩衝材であるベントナイトで覆った後、坑道内の処分ピットに廃棄する（その後、冠水）方法が検討されている。この方法であれば廃棄体からの放射線の漏れは抑えられるが問題点もある。廃棄体は地下300mの応力（水圧も含め）状態にあり、また常に高温で接しているガラス固化体やベントナイトも100～200℃ほどになるため、温度変化によるベントナイトの力学特性を把握することは急務であると考えられる。処分ピット内のベントナイトは、冠水過程に温度変化の影響を受けながら圧密されることとなる。そこで本実験では、温度変化を考慮したベントナイトの圧密試験を実施し、高温状態に晒されるベントナイトの冠水における圧密特性の把握を試みる。特に、圧密試験の結果から得られる間隙比-応力関係（ $e-\log p'$ ）が温度変化によってどのような影響を受けるか把握する。

(1) 試験機概要

通常の圧密試験と同様の試験を行なうが、本研究では高圧力まで荷重を与えられ、さらに温度変化を考慮できるよう試験機を改良する。

①供試体作成用加圧装置

- ・手動油圧ジャッキ方式
- ・載荷柱 4本主柱 耐圧 50KN
- ・ジャッキ 油圧単動ジャッキ 50KN ストローク 100mm
- ・ポンプ 手動ポンプ 70MPa

②圧密ロードセル 2個

- ・型式 ストレーンゲージ式(4枚ゲージ)
- ・容量 50KN
- ・出力 2mV/V

- ③圧密変位計 2個
 - ・型式 ストレーンゲージ式
 - ・容量 25mm
- ④圧密試験容器 容器2台とプランジャー1本
 - ・供試体寸法 $\phi 30 \times 20 \text{mm}$
 - ・底板, 圧密リング, ピストンガイドと加圧板より構成
 - ・供試体作製プランジャー1本付
 - ・ポーラスメタル方式
- ⑤圧密載荷枠
 - ・4本支柱 ベローフラム方式(空気圧載荷)
 - ・ベローフラム $\phi 100$ ストローク 100mm
 - ・膨潤圧測定用ロック機能付
 - ・容量 5KN(空気圧 0.7MPa)

(2) 実験方法

- ① ベントナイトを試料に用いた直径 3cm, 高さ 2cm の供試体を作製する.
- ② 供試体から含水比を測定する.
- ③ 作製した供試体を圧密容器に入れ, 温度管理ができる容器内にセットして周りを水で満たす.
- ④ 温度を室温に設定して圧密を開始. 変位計の読みと, その時の経過時間を測定する.
- ⑤ ①～④の動作を, 圧密時の温度を変化させながら繰り返す (室温～99℃まで約 20℃刻み).
- ⑥測定結果を用いて圧密係数や圧縮曲線, 間隙比-応力関係 ($e-\log p'$) 曲線を求め, 圧密時の特性が温度変化によりどのような影響を受けるのか検証する.

2) 温度変化を考慮した膨潤特性の把握

地層処分では, 処分ピット内において, 廃棄体をガラス固化体の中に入れ, その周りをベントナイト緩衝材で封じ込め冠水させる. ベントナイトの特性として, 非常に透水係数が小さく, 水分を吸収すると通常の土とは異なり自分の体積以上に膨張し, かつスライム状になるため放射線が外に漏れなくなると考えられる. また膨潤することで岩盤との応力均衡が期待できる. しかしながら一方で, 放射性廃棄物は 100～200℃ほどの高温であるため, ベントナイト緩衝材の温度変化による膨潤圧・膨潤量の特性を把握することが急務である. そこで本実験では, 処分ピットである岩盤とベントナイトの応力均衡を把握するため, 100～200℃ほどの高温に晒されることになるベントナイトの膨潤特性が温度変化によってどのように変化するのか把握する.

(1) 試験機概要

①供試体作成用加圧装置

- ・手動油圧ジャッキ方式
- ・載荷枠 4本主柱 耐圧 50KN
- ・ジャッキ 油圧単動ジャッキ 50KN ストローク 100mm ポンプ
- ・手動ポンプ 70MPa
- ②圧密ロードセル 2個
 - ・型式 ストレーンゲージ式(4枚ゲージ)
 - ・容量 50KN
- ③圧密変位計 2個
 - ・型式 ストレーンゲージ式
 - ・容量 25mm

(2) 実験方法

通常の圧密試験の手順で温度変化を考慮しながら試験を行う。圧密試験機にベントナイトをセットした後、周りを水で満たし温度を変化(室温～99℃まで10℃刻み)させながら吸水させる。

○膨潤圧試験

- ・上部を固定しベントナイトの膨潤圧を測定する。

○膨潤量試験

- ・上部は固定せずベントナイトが膨潤することで起きる上部の変位量で膨潤量を測定する。

3) ベントナイトの高温化における一軸強度の把握

本実験では、処分ピット内におけるベントナイト緩衝材の温度変化による強度を知るために一軸圧縮試験を行う。一軸圧縮試験は、供試体に拘束圧を作用させない状態で圧縮し土の強度を求める試験であり、本実験では温度変化に対応できる機構を備えたものである。強熱減量を用い20～100℃の間で加熱した供試体を一軸圧縮試験機にセットし一軸圧縮試験を行い、温度変化時の供試体の強度を調べる。

(1) 試験機概要

①一軸圧縮試験機

型式 電動スクリージャッキ方式

容量 10KN

適用供試体 $\phi 35 \times 80$, $\phi 50 \times 100$ mm

載荷速度 0.1mm/min～1mm/min(ダイヤル設定)

自動・手動切替 クラッチ方式

4) 解析シミュレータの開発・高度化

表-1 に示すように、本研究でのシステムが考慮すべき事象をまとめた。そのため、地下空洞の安定性に対する FEM 解析手法の確立に向けて、解析に必要な初期条件・境界条件、さらにはパラメータの抽出を試みた。それに加え、岩盤の長期挙動を表現できる構成モデルの定式化と解析コードへの組み込みを行った。

表-1 考慮すべき事象

	天然バリア	人工バリア (緩衝材)	
	岩盤	ベントナイト系	セメント系
建設～閉鎖 (再冠水)	掘削影響領域:最適断面 クリープ	不飽和弾塑性 膨潤 透水性	せん断・引張破壊 ひび割れ 透水性
超長期	超長期クリープ 支保のクリープ クラックの影響	変質 (Ca 型化など) 超長期クリープ 熱 (高レベル) 透水性	Ca 溶出 超長期クリープ 熱 (高レベル) 透水性

(1) 地下空洞の安定性を確認するための FEM 解析

①コンプライアンス可変型構成式を導入した解析コードの開発

コンプライアンス可変型構成式である大久保モデルは 1 次元応力下で誘導されたモデルである。一次元応力下でのひずみと応力の関係は、材料を弾性体とした最も単純な Hook の式で以下の様に表される。

$$\varepsilon = \lambda \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 λ はコンプライアンス ($= \varepsilon / \sigma = 1 / E$) である。コンプライアンス可変型構成式は、時間依存性を考慮するために、式(1)に示したコンプライアンス λ の値が時間とともに増加するように取り扱うモデルである。

コンプライアンス λ の増加速度は、その時の応力に依存すると考え、

$$\frac{d\lambda}{dt} = g(\sigma) \quad \dots\dots\dots (2)$$

とおく。この式(2)を考慮して式(1)を書き換えると、

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \lambda \frac{d\sigma}{dt} + g(\sigma) \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。大久保モデルは、式(2)で表されるコンプライアンス λ の増加速度を、

$$\frac{d\lambda}{dt} = g(\sigma) = a \cdot (\sigma)^n \cdot (\lambda)^m \quad \dots\dots\dots (4)$$

という関数で表したものである。

FEM プログラムに大久保モデルを組み込む場合、式(1)～式(4)に示した 1 次元応力下の式を、2 次元に拡張する必要がある。

1 次元応力下では、コンプライアンス λ の増加速度が応力 σ の n 乗に比例しているが、2 次元あるいは 3 次元に拡張する場合には、これを破壊限接近度 σ^* の n 乗に比例すると考える。式(1)～式(4)の大きな変更点はこの部分だけであるが、2 次元あるいは 3 次元に拡張する場合にはこの他にポアソン比 ν が必要になる。また、実際に計算する場合には、式(4)を無次元化すると取り扱いが容易である。

式(4)を 2 次元に拡張すると、式(5)のように表される。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m \quad \dots\dots\dots (5)$$

- a : 強度を示すパラメータ
- λ^* : ひずみ ε と応力 σ の比であるコンプライアンス λ ($= \varepsilon/\sigma = 1/E$) を初期値 λ_0 で基準化した値 ($\lambda^* = E_0/E$)。なお、初期弾性係数 E_0 は入力値。
- σ^* : 破壊接近度
- n : 時間依存性の程度を表す変数
- dt : 時間増分
- m : 破壊の進行性を表すパラメータ (入力値)

なお、式(5)中の各変数については、以下の式で求められる。

$$a = \frac{\{m/(n+1)\}^{m/(n-m+1)}}{t_0} \quad \dots\dots\dots (6)$$

- t_0 : 定ひずみ速度試験を行ったときの、ピーク強度に達するまでの時間 (クリープ基準時間, 入力値)

$$n = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}}{\sigma_c} n_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

- σ_c : 一軸圧縮強度 (入力値)
- n_0 : 一軸応力下での n (入力値)

$$\sigma^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

- σ_1 : 圧縮応力を正とした場合の最大主応力
- σ_3 : 圧縮応力を正とした場合の最小主応力

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}$: 破壊強度

また、2次元あるいは3次元に拡張した場合、ポアソン比 ν が必要になる。ここでは、ポアソン比 ν を以下のように求める。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \dots\dots\dots (9)$$

非増分型計算の場合と同様に、コンプライアンスとポアソン比を求めて更新する。緩和応力を算定するために、弾性係数の増分 dE とポアソン比の増分 $d\nu$ を求める²⁾。

式(1)に示したコンプライアンスの増加速度を、以下のように書き換える。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = \frac{d\lambda^*}{dE} \cdot \frac{dE}{dt} = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$\frac{d\lambda^*}{dE} = \frac{d}{dE} \left(\frac{E_0}{E} \right) = -\frac{E_0}{E^2} \dots\dots\dots (11)$$

であることから、式(10)に式(11)を代入して、

$$-\frac{E_0}{E^2} dE = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot \left(\frac{E_0}{E} \right)^m \cdot dt \dots\dots\dots (12)$$

となる。式(12)を整理すると、弾性係数の増分 dE は以下のようになる。

$$dE = -a \cdot (\sigma^*)^n \cdot E_0^{m-1} \cdot E^{2-m} \cdot dt \dots\dots\dots (13)$$

なお弾性定数の増分 dE は、コンプライアンスの増分 $d\lambda^*$ と同様に、ステップ i における応力 σ_i と弾性係数 E_i を用いて計算される。

更新されるポアソン比 ν_{i+1} は、式(9)に $\lambda^* = E_0/E$ を代入して、

$$\nu_{i+1} = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*_{i+1}} = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{E_0} E_{i+1} \dots\dots\dots (14)$$

となり、

$$\begin{aligned} \nu_i + d\nu &= 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{E_0} (E_i + dE) \\ &= 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{E_0} E_i - \frac{0.5 - \nu_0}{E_0} dE \end{aligned} \dots\dots\dots (15)$$

と置き換えられる。ゆえに、ポアソン比の増分 $d\nu$ は以下のようになる。

$$d\nu = -\frac{0.5 - \nu_0}{E_0} dE \dots\dots\dots (16)$$

式(13)に示したように、ポアソン比 ν はコンプライアンス λ^* の関数で表される。コンプライアンス λ^* は弾性係数 E の関数であることから、微分すると、

$$\frac{d\nu}{dE} = \frac{d\nu}{d\lambda^*} \cdot \frac{d\lambda^*}{dE}, \quad \lambda^* = \frac{E_0}{E}, \quad \frac{d\nu}{d\lambda^*} = \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^{*2}}, \quad \frac{d\lambda^*}{dE} = -\frac{E_0}{E^2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。よってポアソン比の増分 $d\nu$ は、

$$d\nu = \frac{d\nu}{d\lambda^*} \cdot \frac{d\lambda^*}{dE} \cdot dE = -\frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^{*2}} \cdot \frac{E_0}{E^2} \cdot dE = -\frac{0.5 - \nu_0}{E_0} \cdot dE \quad \dots\dots\dots (18)$$

となり、式(16)と同じ式が得られる。

応力増分 $\Delta\sigma$ とひずみ増分 $\Delta\epsilon$ を以下の式により求め、

$$\Delta\sigma = \mathbf{D} \cdot \Delta\epsilon - \Delta\sigma_r \quad \dots\dots\dots (19)$$

ステップ $i-1$ における応力 σ_{i-1} とひずみ ϵ_{i-1} に加える。

$$\sigma_i = \sigma_{i-1} - \Delta\sigma \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\epsilon_i = \epsilon_{i-1} - \Delta\epsilon \quad \dots\dots\dots (21)$$

なお、式(19)におけるマトリックス \mathbf{D} は、ステップ i におけるコンプライアンス λ_i^* とポアソン比 ν_i を用いて計算されたものを使用する。

式(19)における緩和応力 $\Delta\sigma_r$ について考える。

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_r &= \mathbf{D}(\lambda_i^*, \nu_i) \cdot \epsilon_{i-1} - \mathbf{D}(\lambda_{i-1}^*, \nu_{i-1}) \cdot \epsilon_{i-1} \\ &= \left\{ \mathbf{D}(\lambda_i^*, \nu_i) - \mathbf{D}(\lambda_{i-1}^*, \nu_{i-1}) \right\} \cdot \epsilon_{i-1} \quad \dots\dots\dots (22) \\ &= \Delta\mathbf{D} \cdot \epsilon_{i-1} \end{aligned}$$

と計算できる。

また、式(22)における $\Delta\mathbf{D}$ は、 $\mathbf{D} = \mathbf{D}(\lambda^*, \nu) = \mathbf{D}(E, \nu)$ より

$$\Delta\mathbf{D} = \Delta\mathbf{D}(E, \nu) = \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial E} dE + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial\nu} d\nu \quad \dots\dots\dots (23)$$

である。 \mathbf{D} マトリックスを総和規約で書き直すと、

$$\mathbf{D} = D_{ijkl} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \left\{ \nu \cdot \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{1-2\nu}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

となる。この式(24)より式(23)左辺の偏微分は、

$$\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial E} = \frac{1}{(1-2\nu)(1+\nu)} \left\{ \nu \cdot \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{1-2\nu}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\frac{\partial\mathbf{D}}{\partial\nu} = \frac{E}{(1-2\nu)^2(1+\nu)^2} \left\{ (1+2\nu^2) \cdot \delta_{ij} \delta_{kl} + -2 \left(\frac{1}{2} - \nu \right)^2 (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \right\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

となる。

なお、式(26)は、

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \nu} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial a} \frac{\partial a}{\partial \nu} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial b} \frac{\partial b}{\partial \nu} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial \nu} \dots\dots\dots (27)$$

$$\mathbf{D} = \frac{E}{a} \{b \cdot \delta_{ij} \delta_{kl} + c(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})\}, \quad \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial a} = -\frac{E}{a^2} \{b \cdot \delta_{ij} \delta_{kl} + c(\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})\}$$

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial b} = \frac{E}{a} (\delta_{ij} \delta_{kl}), \quad \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial c} = \frac{E}{a} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad \frac{\partial b}{\partial \nu} = \frac{\partial}{\partial \nu}(\nu) = 1$$

$$\frac{\partial a}{\partial \nu} = \frac{\partial}{\partial \nu} \{(1-2\nu)(1+\nu)\} = \frac{\partial}{\partial \nu} \{1-\nu-2\nu^2\} = -1-4\nu, \quad \frac{\partial c}{\partial \nu} = \frac{\partial}{\partial \nu} \left(\frac{1-2\nu}{2} \right) = -1$$

より求めている。

2次元平面ひずみ条件を仮定すると、

$$\Delta \mathbf{D} = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix} dE \dots\dots\dots (28)$$

$$+ \frac{E}{(1+\nu)^2(1-2\nu)^2} \begin{bmatrix} 2\nu(2-\nu) & 1+2\nu^2 & 0 \\ 1+2\nu^2 & 2\nu(2-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & -2(0.5-\nu)^2 \end{bmatrix} d\nu$$

としているが、式(23)および式(26)、式(27)で2次元平面ひずみ条件を仮定すると同じ式が求められる。

なお、

$$\lambda_i^* = \lambda_{i-1}^* + d\lambda^*, \quad \nu_i = \nu_{i-1} + d\nu \dots\dots\dots (29)$$

であり、

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{D} &= \mathbf{D}(\lambda_i^*, \nu_i) - \mathbf{D}(\lambda_{i-1}^*, \nu_{i-1}) \\ &= \mathbf{D}(\lambda_{i-1}^* + d\lambda^*, \nu_{i-1} + d\nu) - \mathbf{D}(\lambda_{i-1}^*, \nu_{i-1}) \dots\dots\dots (30) \\ &\neq \mathbf{D}(d\lambda^*, d\nu) \end{aligned}$$

である。

②コンプライアンス可変型構成方程式の有限要素法への導入について

・有限要素離散化

コンプライアンス可変型構成方程式（以下、構成式）を有限要素解析コードに導入する

際に用いる場の支配方程式は、釣合式、構成式、適合条件式である。まず、これらを弱形式化し、有限要素法をもちいて空間離散化する。さらにオイラー法によって、時間離散化する。

場の支配方程式

場の支配方程式をまとめると以下のようなになる。ただし、圧縮側を正とし、微小変形を仮定する。

釣合式 $\text{div}\boldsymbol{\sigma}^T + \rho\mathbf{g} = 0, \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^T \dots\dots\dots (1)$

構成式 $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \{\dot{\boldsymbol{\sigma}}_r\} \dots\dots\dots (2)$

適合条件式 $\boldsymbol{\varepsilon} = -\frac{1}{2}(\nabla\mathbf{u})^s \dots\dots\dots (3)$

ここで、構成式が速度型で与えられていることから、速度型として整合をとるために釣合式、適合条件式をそれぞれ全微分し速度型（増分型）に書き直すと、以下のような初期値・境界値問題が得られる。

増分型釣合式 $\text{div}\dot{\boldsymbol{\sigma}}^T + \dot{\rho}\mathbf{g} = 0, \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \dot{\boldsymbol{\sigma}}^T \dots\dots\dots (4)$

構成式 $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \{\dot{\boldsymbol{\sigma}}_r\} \dots\dots\dots (5)$

増分型適合条件式 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = -\frac{1}{2}(\nabla\dot{\mathbf{u}})^s = -\frac{1}{2}(\nabla\dot{\mathbf{u}} + \nabla\dot{\mathbf{u}}^T) \dots\dots\dots (6)$

ここで、 $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$: 全応力速度テンソル, \mathbf{D} : 弾性剛性テンソル, $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$: ひずみ速度テンソル, $\{\dot{\boldsymbol{\sigma}}_r\}$: 緩和応力速度テンソル, $\dot{\mathbf{u}}$: 変位速度ベクトル, 上付きの s は()内のテンソルの対称部分を示す。

・釣合式の弱形式化

以下のような試験関数を与える。

$$\forall \delta\dot{\mathbf{u}} \in \left\{ \delta\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = -\frac{1}{2}(\nabla\delta\dot{\mathbf{u}} + \nabla\delta\dot{\mathbf{u}}^T) : \delta\dot{\mathbf{u}} = 0 \quad \text{on} \quad S_u \right\} \dots\dots\dots (7)$$

この試験関数を釣合式に乘じ，領域 V で体積積分を行う。

$$\int_V \text{div}(\boldsymbol{\sigma} \cdot \delta \dot{\mathbf{u}}) dV - \int_V \boldsymbol{\sigma} : \nabla \delta \dot{\mathbf{u}} dV = 0 \dots\dots\dots (8)$$

式(8)右辺第 1 項にガウスの発散定理を用いると，

$$\int_S \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} \cdot \delta \dot{\mathbf{u}} dS - \int_V \boldsymbol{\sigma} : \nabla \delta \dot{\mathbf{u}} dV = 0 \dots\dots\dots (9)$$

さらに，応力テンソルの対称性を考慮すると，

$$\int_{S_\sigma} \bar{\mathbf{t}} \cdot \delta \dot{\mathbf{u}} dS + \int_V \boldsymbol{\sigma} : \delta \boldsymbol{\varepsilon} dV = 0 \dots\dots\dots (10)$$

・空間離散化・時間離散化

次に，離散化を行うにあたって以下の仮定を与える。

- a) アイソパラメトリック要素を用いるので，変位は各節点（ガウスポイント）でもたせる。
- b) ガラーキン法を適用する。
- c) 増分量の評価に対して Euler 近似を適用する。

・釣合式の空間離散化および時間離散化

ここで節点変位に関する内挿関数マトリクスを \mathbf{N} と仮定すると，次の関係式が得られる。

$$\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{N} \dot{\mathbf{u}}^N$$

ここに， $\{\dot{\mathbf{u}}\}$ ：要素の節点位置における節点変位， \mathbf{N} ：節点変位に関する内挿関数マトリクス

さらに，

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{B} \dot{\mathbf{u}}^N$$

ここで， \mathbf{B} ：節点変位からひずみを求めるマトリクス

また構成式は，

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma}' &= \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \{\dot{\boldsymbol{\sigma}}_r\} \dots\dots\dots (11) \\ &= \mathbf{D} : \mathbf{B} \dot{\mathbf{u}}^N - \{\dot{\boldsymbol{\sigma}}_r\} \end{aligned}$$

となる。さらに，ガラーキン法を適用すると，

$$\delta \dot{\mathbf{u}} = \mathbf{N} \delta \dot{\mathbf{u}}^N, \quad \delta \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{B} \delta \dot{\mathbf{u}}^N \dots\dots\dots (12)$$

である。よって，式(52)は，

$$\int_{S_\sigma} \delta \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{N}^T dS \bar{\mathbf{t}} = \int_V \delta \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{B}^T dV \dot{\boldsymbol{\sigma}}' - \int_V \delta \dot{\mathbf{u}}^T \mathbf{B}^T \{ \dot{\boldsymbol{\sigma}}_r \} dV \dots\dots\dots (13)$$

さらに、両辺から $\{ \delta \dot{\mathbf{u}} \}^T$ を除すると、

$$\int_{S_\sigma} \mathbf{N}^T dS \bar{\mathbf{t}} = \int_V \mathbf{B}^T dV \dot{\boldsymbol{\sigma}}' - \int_V \mathbf{B}^T \{ \dot{\boldsymbol{\sigma}}_r \} dV \dots\dots\dots (14)$$

ここで、

$$\int_{S_\sigma} \mathbf{N}^T dS \bar{\mathbf{t}} = \dot{\mathbf{F}}, \quad \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV = \mathbf{K}$$

とすると、

$$\dot{\mathbf{F}} = \mathbf{K} \dot{\mathbf{u}}^N - \int_V \mathbf{B}^T \{ \dot{\boldsymbol{\sigma}}_r \} dV \dots\dots\dots (15)$$

ここで、 $t=t$ から $t=t+\Delta t$ の間で、時間離散化を行う。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{u}}^N &= \frac{\Delta \mathbf{u}^N}{\Delta t}, \quad \dot{\mathbf{F}} = \frac{\Delta \mathbf{F}}{\Delta t}, \quad \{ \dot{\boldsymbol{\sigma}}_r \} = \frac{\Delta \boldsymbol{\sigma}_r}{\Delta t} \text{ より,} \\ \frac{\Delta \mathbf{F}}{\Delta t} &= \mathbf{K}_{UU} \frac{\Delta \mathbf{u}^N}{\Delta t} - \int_V \mathbf{B}^T \frac{\{ \Delta \boldsymbol{\sigma}_r \}}{\Delta t} dV \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

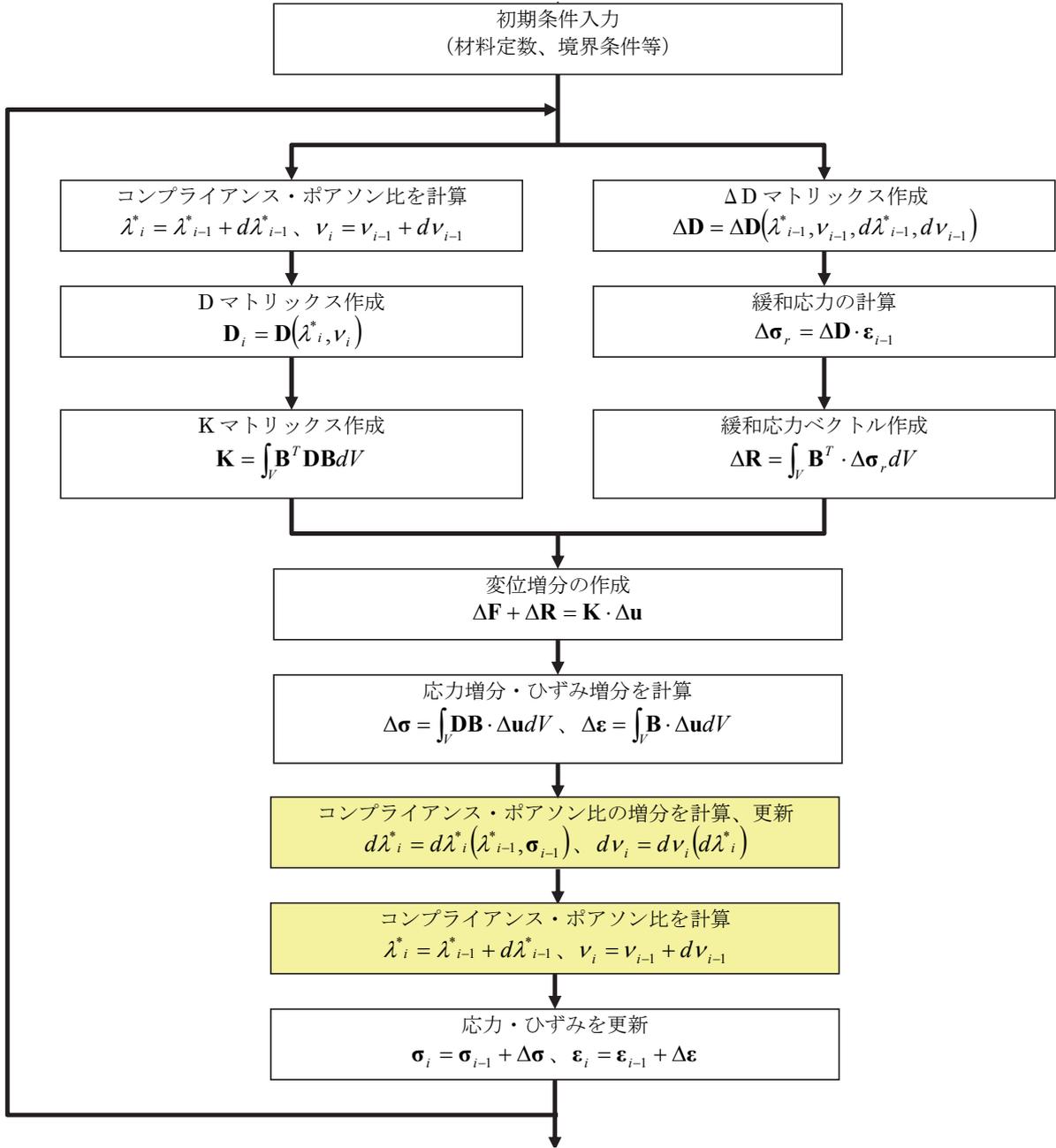
よって、

$$\mathbf{K} \Delta \mathbf{u}^N = \Delta \mathbf{F} - \int_V \mathbf{B}^T \{ \Delta \boldsymbol{\sigma}_r \} dV \dots\dots\dots (17)$$

$$\text{ここで、} \{ \Delta \boldsymbol{\sigma}_r \} = -[\Delta D] \{ \boldsymbol{\varepsilon} \} \dots\dots\dots (18)$$

以上、有限要素法を用いて空間・時間離散化を行った。式(59)を解くことで、未知数である $\{ \Delta \mathbf{u}^N \}$ の解を得る。

解析のアルゴリズム



③開発した解析コードの検証

(a)一軸圧縮試験の解析

コンプライアンス可変型構成方程式を導入した DACSAR の検証を行うため、一軸圧縮試験の解析を行った（組み込んだモデルのチェックのみである）。解析に用いたパラメータを表-2 に示す。

表-2 材料パラメータ

飽和密度 ρ (Mg/m ³)	2.67
一軸圧縮強度 q_u (MPa)	115
弾性係数 E (MPa)	37000
ポアソン比 ν	0.25
引張強度 σ_t (MPa)	8.0
n_0	30
m	20
初期応力 σ (MPa)	26.7

(b)解析結果

図-1 に一軸圧縮試験の応力-ひずみの結果を示す。通常の一軸圧縮試験と同様にピーク強度（正規化応力-正規化ひずみ）を示し、その後軟化傾向を示した。その結果、コンプライアンス可変型を組み込んだプログラムが正しく計算されていることを確認した。

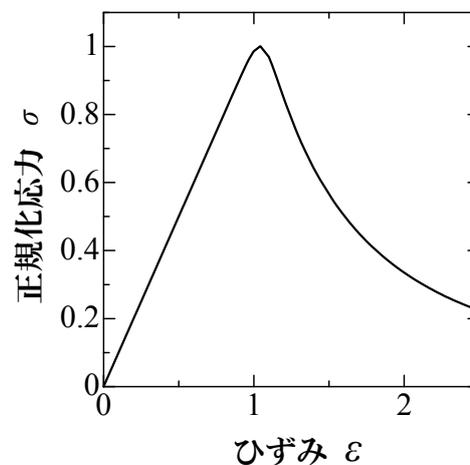


図-1 一軸圧縮試験結果

4. 来年度の研究計画

次年度からは、ベントナイトに関する各種（膨潤量，膨潤圧，温度変化による一軸強度）データを取得する。さらに，解析シミュレータの開発と高度化を図り，要素解析を実施する。

(1) 圧密試験機，一軸試験機を用いた室内実験の実施

改良した試験機を用いて，吸水過程でのベントナイト膨潤量，膨潤圧の計測および，温度変化によるベントナイトの一軸強度を計測する。

(2) 解析シミュレータの開発・高度化

溶存溶解モデル（ヘンリーの法則を考慮した液相・気相の連続条件式）を解析コードに組み込み，ベントナイト緩衝材内部の封入空気に与える影響を検討する。

(3) 実験データの再現解析

実験結果との整合性を確認するため，ベントナイト緩衝材の室内試験（膨潤圧試験・圧密試験等）の再現解析を行ない，用いるパラメータの妥当性を検討する。

(4) 地層処分施設の長期挙動の解析条件の整備

瑞浪超深地層科学研究所で研究されてきた深地層の地盤状態（深度ごとの応力状態や水理状態など）を地層処分施設の長期挙動解析に用いる初期条件・境界条件・解析ケースとして整理する。

【参考文献】

- 1) 大久保誠介，何昌栄，西松裕一：一軸圧縮応力下における時間依存性挙動，日本鉱業会誌，103, pp.177-181, 1987.
- 2) 宮野前俊一，野本康介，森田篤，松井幹雄，梨本裕，大久保誠介：岩盤の時間依存性と施工過程を考慮した掘削解析手法の提案，土木学会論文集 No.791, IV-67, pp.97-109, 2005.

研究報告 4

硝酸塩影響評価のための高イオン強度下における
アクチノイドの溶液化学的研究

京都大学大学院 工学研究科

小林 大志

1. 背景と目的

1.1 はじめに

放射性廃棄物の中で主に再処理工場や MOX 燃料加工工場から発生する長半減期低発熱放射性廃棄物 (TRU 廃棄物) は、ハル・エンドピースや濃縮廃液固化体、焼却灰、不燃物セメント固化体などその性状が多岐にわたるとともに含まれる放射性物質の核種や濃度も様々である。第 2 次 TRU レポートでは、これら廃棄物について、放射性物質濃度に応じた適切な処分方法を探ることが述べられており、コンクリートピット処分対象となるものが約 60%、余裕深度処分対象となるものが約 20%、地層処分対象となるものが約 20%程度とされている[1]。TRU 廃棄物の中でも廃銀吸着剤やハル・エンドピース、濃縮廃液固化体などは含まれる放射能濃度が高いことから地層処分対象の廃棄物とされており、高レベル放射性廃棄物の地層処分と同様、人工バリア・天然バリアからなる多重バリアによる長期的な安全確保を行うことが求められている。

さらに、第 2 次 TRU レポートでは、TRU 廃棄物をその性状に応じて 4 つのグループに分類している。グループ 1 および 2 は、それぞれ廃銀吸着剤のセメント固化体およびハル・エンドピースの圧縮収納体であり、I-129 や C-14 など地下水により比較的移行しやすい核種を含んでいることから止水性能の高い緩衝材をバリアとして設置するとされている。一方、濃縮廃液固化体などのグループ 3 および焼却灰、不燃物セメント固化体などその他の廃棄物であるグループ 4 については、緩衝材は設置せず、セメント系材料により埋め戻すことが検討されている[1]。グループ 3 に分類される濃縮廃液固化体には再処理工程の過程で用いられる硝酸塩 (主に NaNO_3) が多量に含まれており、硝酸塩が廃棄体から溶出することにより処分施設構成要素の機能や放射性核種の移行挙動に影響を及ぼす可能性が考えられる。放射性廃棄物処分の安全評価では、処分環境下における放射性核種の移行挙動を高い信頼性により把握・予測する必要があり、硝酸塩影響は TRU 廃棄物処分の安全評価において考慮すべき事象の一つである。

また、TRU 廃棄物の地層処分に関しては、高レベル放射性廃棄物との併置処分の技術的成立性の検討が進められており、それぞれの処分施設の存在が他方の施設からの放射性核種の移行挙動に影響を与える可能性のある因子 (相互影響因子) を適切に評価することが求められている。TRU 廃棄物のグループ 3 に含まれる硝酸塩は、硝酸塩溶液条件を形成することにより核種の溶解度や収着分配挙動に影響を及ぼす可能性があり、評価すべき相互影響因子の一つとされている。

1.2 研究の背景

放射性核種の移行挙動に影響を及ぼす可能性がある硝酸塩影響として、第 2 次 TRU レポートでは、硝酸イオンの化学的変遷および核種移行パラメータに対する硝酸塩の影響について検討が行われている[1]。また、平成 19~24 年度に行われた日本原子力研究開発機構に

よる「硝酸塩処理・処分技術高度化開発」[2]では、硝酸塩影響の評価システムの構築と硝酸塩除去技術の開発が行われており、硝酸塩影響評価システム構築の中では、評価モデルに基づいた解析ケースが示されている。

グループ3の廃棄物に含まれる硝酸塩から発生する硝酸イオン (NO_3^-) は、処分施設内に存在する還元性物質（金属及び有機物）により亜硝酸イオン (NO_2^-) やアンモニアイオン (NH_4^+) に還元される可能性がある。これまでの報告では、金属 (Fe) 腐食に伴う NO_3^- の化学的変遷の他、脱窒菌による NO_3^- の還元作用も組み込んだ NO_3^- の化学的変遷の評価モデルの構築が進められており[1,2]、日本原子力研究開発機構により示された解析ケースでは、硝酸塩濃度は処分開始時点において最大濃度となった後、時間とともに減少し、およそ40000年後には消失するような結果が示されている（図1）。同報告による評価モデルでは、 NO_3^- は主に微生物や黄鉄鉱 (FeS) により還元されるため、併置処分への影響評価において現行の評価パラメータを用いた場合、高濃度の硝酸塩環境はグループ3の廃棄体周辺数百 m 以内に限定され、高レベル放射性廃棄物処分施設付近では、 NO_3^- はほとんど NH_4^+ に還元されると考えられている[2]。しかし、上述のように初期におけるグループ3の廃棄体近傍では飽和濃度付近の NaNO_3 溶液条件が形成されることが示唆されており、特にグループ3に含まれる核種については、高濃度の NaNO_3 溶液条件下での溶解度や収着分配挙動などを評価する必要があると考えられる。

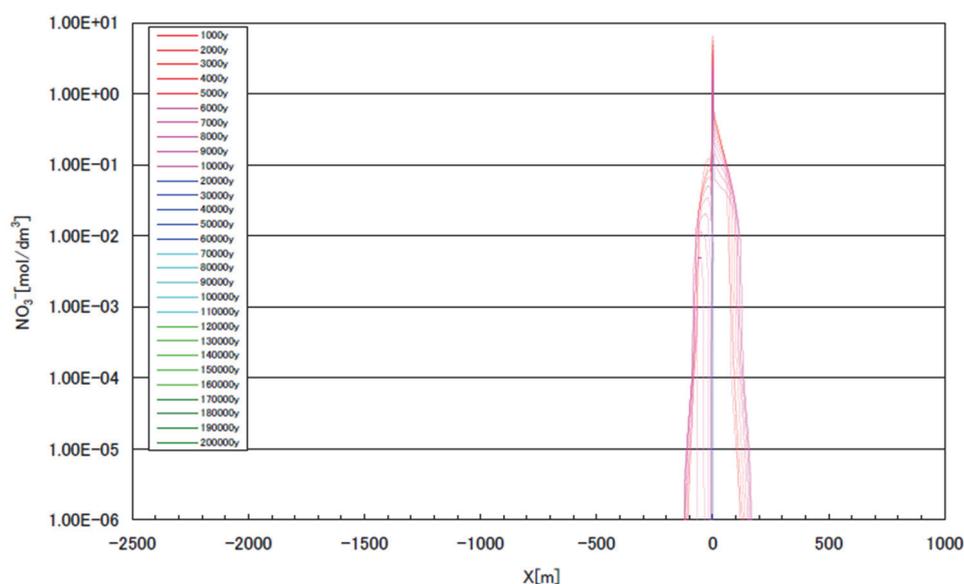
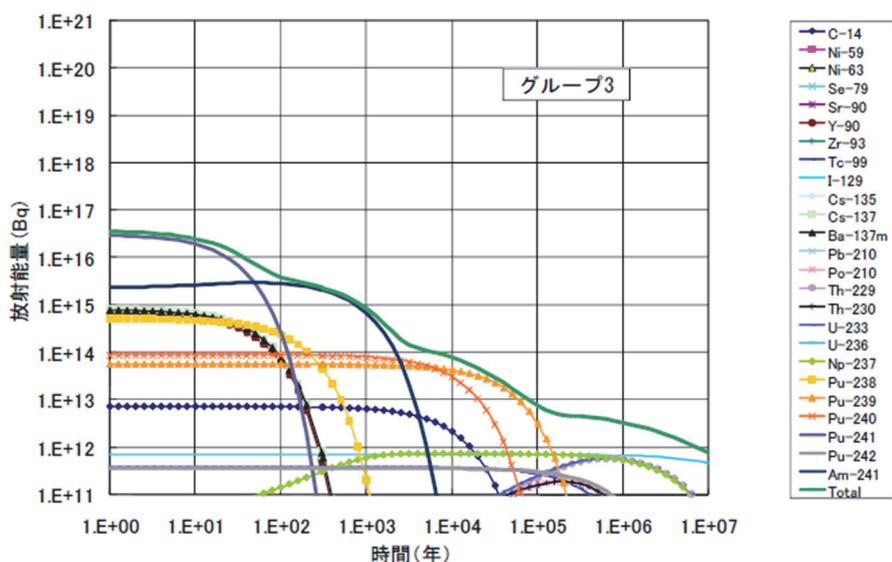


図1 解析体系 X 軸上の硝酸イオン濃度分布[2]

図2はグループ3に含まれる主要な核種の放射エネルギーの時間変化を表したものであり[3]、処分後はPu-241、Am-241、Pu-240、Pu-239、Np-237などのアクチノイドが順次放射エネルギーを支配するとされている。廃棄体の位置関係や処分後の経過時間によって硝酸塩濃度は変化するため、硝酸塩影響の定量的な評価を行うためには、希薄濃度から高濃度までNaNO₃溶液条件下でのアクチノイドの移行挙動を予測可能な包括的な熱力学モデルの構築が不可欠と考えられる。



(c) グループ3の主要な核種の放射エネルギーの時間変化

図2 グループ3に含まれる主要な核種の放射エネルギーの時間変化[3]

第2次 TRU レポートでは、核種移行パラメータに影響を及ぼし得る具体的な硝酸塩影響として、酸化還元条件、錯体形成による影響および可溶性元素に対する影響などが想定されている[1]。酸化還元条件は、処分場内部および近傍で高濃度のNO₃⁻が存在することにより雰囲気酸化性条件になることを考慮したものであり、酸化還元に鋭敏な核種の酸化状態が変化することにより核種の移行挙動が大きく影響を受ける可能性が指摘されている。錯生成による影響は、NO₃⁻や還元生成物であるNH₄⁺が核種と安定な錯体を形成することにより、従来の核種の溶解度や収着分配挙動が変化するものである。第2次 TRU レポートでは、4価、5価アクチノイドとNO₃⁻の錯体形成について検討が行われている。一方、NH₄⁺はニッケル、パラジウム、ニオブ、鉛等と錯生成する可能性があり、これら核種のアンモニア錯体形成についても影響評価が進められている。また、グループ3の廃棄体施設を中心として、希薄濃度から高濃度までのNaNO₃溶液条件が形成されるため、イオン強度に

じて溶存化学種の活量が変化する。アクチノイドは地下水中で加水分解反応や地下水由来の無機、有機配位子との錯生成反応を起こすが、これら関連する反応の平衡定数は活量変化の影響を受ける。既往研究の多くは希薄溶液から中程度のイオン強度下で行われており、活量変化の影響が顕著に表れる高イオン強度下については、これまで十分な実測データの取得やその影響評価がなされているとは言い難いのが現状である。最後に、可溶性元素に対する影響では、炭素や塩素、セシウムなど可溶性元素のセメントペースト硬化体や凝灰岩に対する収着分配係数に対する硝酸濃度の影響が評価されている。

以下では、特に、グループ 3 に含まれるアクチノイドに関わる硝酸塩影響として、酸化還元、錯生成およびイオン強度影響に着目し、それぞれの知見について簡単に整理する。

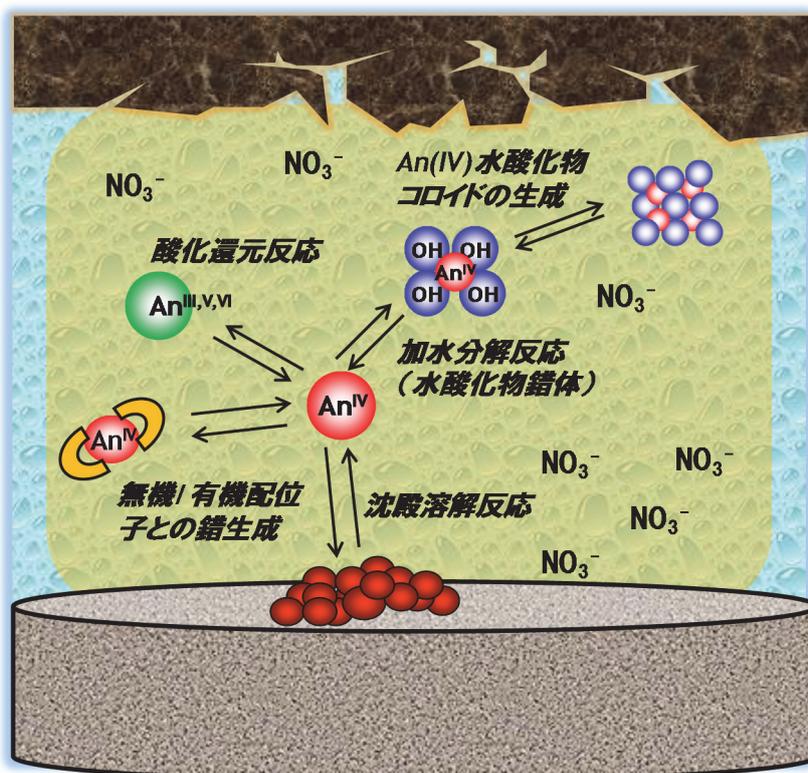


図3 高濃度 NaNO_3 溶液下でのアクチノイドの溶液化学反応

○酸化性条件

TRU 廃棄物のグループ 3 の処分施設内部および近傍では、高濃度の NaNO_3 溶液条件が形成される。日本原子力研究開発機構では、ネプツニウム、ウラン、テクネチウムおよびセ

レンを対象とし、各元素の還元性固相に種々の濃度の硝酸塩水溶液を添加することで不飽和溶解度試験を行い、溶解度に及ぼす硝酸塩の影響が調べられている[2]。ネプツニウム、ウランおよびセレンについては、 NO_3^- 濃度の変化によって溶解度が大きく変化する様子は確認されず(図4)、酸化還元反応に及ぼす NO_3^- の影響は限定的であると考えられた。また、テクネチウムについては、一部の試料は難溶性の4価 $\text{TcO}(\text{OH})_2$ 固相から可溶性の7価 TcO_4^- へと酸化されたが(図5)、明確な NO_3^- 濃度依存性は確認できず、寧ろ、溶液の酸化還元電位(Eh)に従った酸化挙動であると考えられた[2]。また、NaCl溶液下のEh値と NaNO_3 溶液のEh値に大きな差異は見られず、 NO_3^- による酸化性条件を評価するためには、 NO_3^- による酸化還元反応のメカニズムを明らかにする必要があると考えられる。

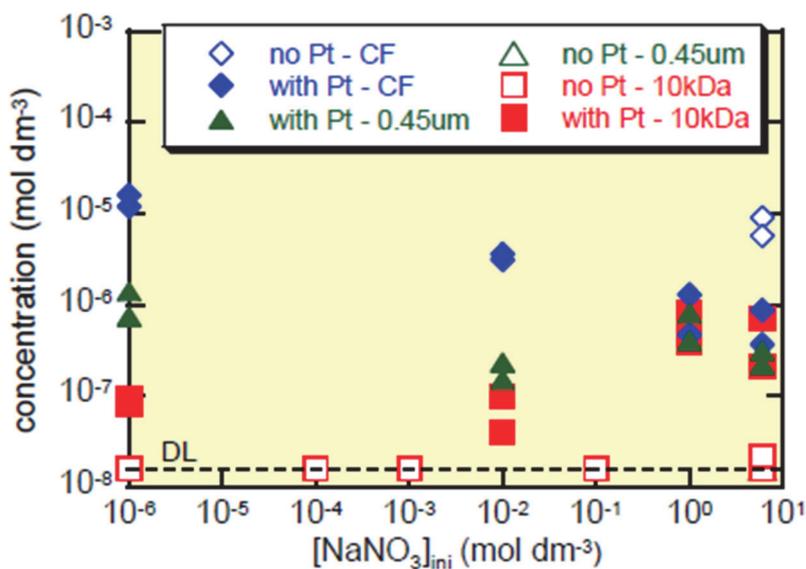


図4 白金触媒下におけるNp溶解度の硝酸濃度依存性[2]

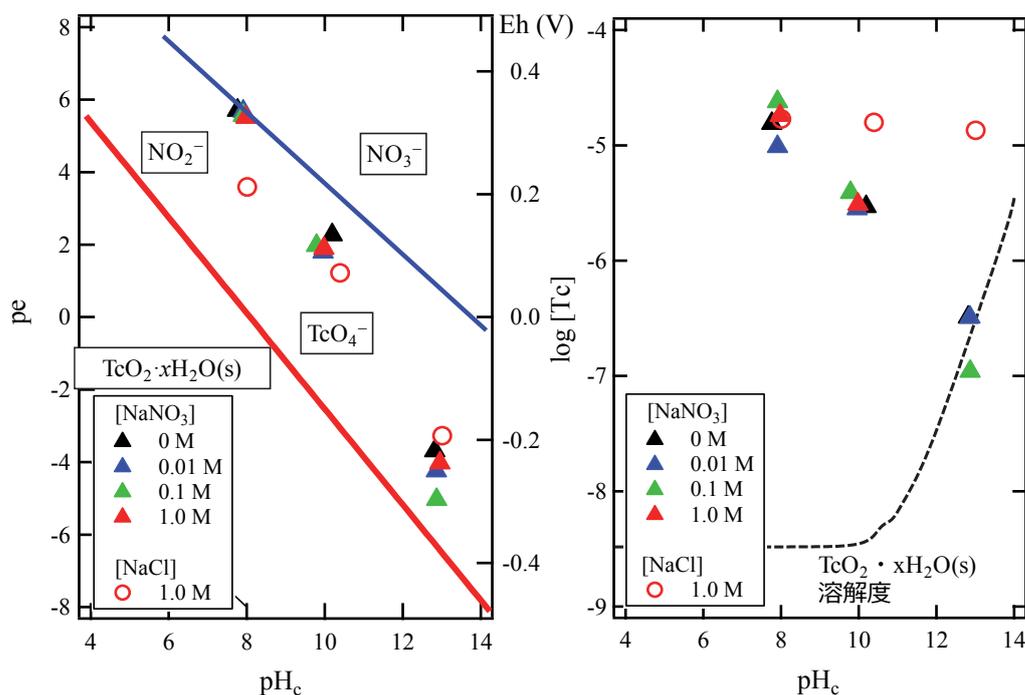


図5 NaNO₃およびNaCl溶液中におけるpH-Eh測定値およびTc溶解度[2]

○錯体形成（硝酸イオン）

硝酸塩環境下では、アクチノイドと硝酸イオンが錯体を形成することにより溶解度や収着分配挙動が影響を受ける可能性がある。しかし、中性からアルカリ性 pH 条件下ではアクチノイドの加水分解反応が優勢となり、第2次 TRU レポートでは、グループ3の処分施設内外において、3価および4価アクチノイドの硝酸錯体は支配的な化学種とはならないとされている[1]。また、酸化性条件で生成する核種とされる5価ネプツニウムについても10⁻⁶ Mから飽和濃度までの硝酸塩濃度範囲において、溶解度に対する有意な硝酸塩影響は報告されていない[1]。一方、最近の研究では、3価ネオジウムおよびキュリウム (M(III)) について、マグネシウムイオン、硝酸イオンを含む3元系において、複合錯体 (Mg-M(III)-OH-NO₃) の存在可能性が指摘されている[4]。また、アクチノイドと硝酸イオンの相互作用の正確な解釈については近年でも議論が行われており、アクチノイドと硝酸イオンの錯生成に基づく考え方とアクチノイドイオン (An^{m+}) は硝酸イオンと錯生成せず、An^{m+}とNO₃⁻のイオン間の相互作用、即ち、活量の補正により両者の相互作用を解釈する考え方が示されている [5-7]。地下水条件の pH では、アクチノイドに対する硝酸イオンによる錯生成は、一般に水酸化物イオンや炭酸イオンと比較すると弱く、アクチノイドの溶解度に顕著な影響を及ぼす可能性は低い。しかし、アクチノイドと硝酸イオンの相互作用をイオン相互作用、即ち、活量補正として解釈した場合は、中性からアルカリ性 pH 条件下においても“イオン強度影響”として硝酸塩影響が表れる可能性がある。アクチノイドと硝酸イオンの相互作用 (2元

系だけでなく、3 元系を含む) に関する正確な評価を行うためには、溶存化学種の化学量論の決定や構造解析、活量補正など包括的な検討、考察が必要と考えられる。

○イオン強度影響 (錯生成/コロイド生成)

多価金属元素であるアクチノイドは、地下水中には強い加水分解反応により水酸化物錯体や水酸化物沈殿を形成する。また、地下水中に存在する無機、有機配位子ともその種類や濃度に応じて錯体を形成すると考えられ、地下水条件下でのアクチノイドの溶解度は、加水分解種や無機、有機錯体によって支配される。特に、リファレンス地下水 (全炭酸濃度 10^{-3} mol/dm^3 程度) では、4 価アクチノイドの加水分解種や炭酸錯体、ヒドロキソ炭酸錯体などが支配的な溶存種として設定されている (表 1) [1,2]。

表 1 リファレンスケースにおけるアクチノイドの支配的溶存化学種

核種	支配的な化学種
Th	$\text{Th}(\text{OH})_4(\text{aq})$, $\text{ThOH}(\text{CO}_3)_4^{5-}$, $\text{Th}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$
U	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$, $\text{U}(\text{OH})_4(\text{aq})$, $\text{U}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$
Np	$\text{Np}(\text{OH})_4(\text{aq})$, $\text{Np}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$
Pu	$\text{Pu}(\text{OH})_4(\text{aq})$, $\text{Pu}(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$, $\text{Pu}^{\text{III}}(\text{CO}_3)_n^{3-2n}$

これら加水分解種や錯体の存在量は、各化学種の生成反応における平衡定数 (加水分解定数、錯生成定数と呼ばれる) を用いて表すことが可能である。これら関連する錯体の平衡定数は、熱力学データベースとして、現在、国内外でその整備が進められ、標準状態 (25°C 、 I (イオン強度) = 0) における推奨値の選定が行われている [7-9]。

グループ 3 の廃棄体処分施設近傍で表れる高濃度 NaNO_3 溶液条件は、経過時間や施設からの距離により、飽和濃度から希薄濃度まで変化すると考えられることから、関連するアクチノイドの加水分解定数や錯生成定数の値も NaNO_3 濃度に起因するイオン強度に応じて変化する。これは、溶液のイオン強度によりイオンや錯体種の活量が変化するためであり、低濃度から高濃度までの NaNO_3 溶液条件下でのアクチノイドの加水分解種や錯体の存在量を把握するためには、反応の平衡定数だけでなく、活量補正に関わるパラメータを整備する必要がある。グループ 3 に含まれるプルトニウムやネプツニウムなどの 4 価アクチノイドは加水分解反応が非常に複雑であるため、加水分解定数や炭酸錯体の錯生成定数について、信頼性の高い値が十分得られていないのみならず、イオン強度補正法である SIT [7,8] や Pitzer 法[10]を適用する際のイオン相互作用係数など強度補正に必要なパラメータ値も不

足している。

さらに、4価アクチノイドは加水分解反応により nm サイズの微小なコロイド種を形成することが報告されている[11-14]。生成したコロイド種は、酸性から中性 pH において比較的安定に水溶液中に存在し、4価アクチノイドの見かけの溶解度を増加させる。一般に、コロイド種は、高塩濃度の溶液中では凝集、成長が進行すると考えられるが、既報では4価トリウムの水酸化物コロイドが高濃度の NaCl、MgCl₂ 溶液中においても安定に存在することが示されている[14]。nm サイズの微小なコロイド種の存在は、アクチノイドの見かけの溶解度に大きく影響するため、その生成メカニズムや安定性について明らかにする必要がある。

1.3 研究の目的および概要

第2次 TRU レポートおよび日本原子力研究開発機構による硝酸塩影響評価では、核種溶解度や収着分配係数、実行拡散係数などが核種移行パラメータとして設定され、設定値に基づいた評価が行われている[1,2]。報告書で述べられている硝酸塩影響下にある緩衝材間隙水中におけるアクチノイドの溶解度は、6.0 mol/kg の NaNO₃ 濃度のみ増加し、1.0 mol/kg 以下の NaNO₃ 濃度では変化がなかった。そこで、1.0 mol/kg 以下の NaNO₃ 濃度条件下でのアクチノイドの溶解度設定値は、NaNO₃ 濃度を 0 mol/kg または 1.0 mol/kg とした計算を行い、保守的な値が得られる方が採用されている。このような核種移行パラメータ設定の妥当性を確保するためには、これまで述べてきたように、アクチノイドの溶解度を決定する酸化還元反応、錯生成（硝酸/その他配位子）、コロイド生成挙動などについて、高濃度までの幅広い濃度範囲の NaNO₃ 溶液に対して適用可能な熱力学モデルを構築する必要がある。本研究では、TRU 廃棄物、特にグループ 3 に含まれるアクチノイドであるプルトニウムの NaNO₃ 溶液下での溶解度に着目し、プルトニウムを用いた実験を実施するとともに、プルトニウムのアナログ元素であるジルコニウムおよび4価アクチノイドとして安定なトリウムを用いた実験を行う。

錯生成反応への硝酸影響の評価では、4価ジルコニウムおよびトリウムの幅広い濃度範囲の NaNO₃ 溶液下での溶解度試験を処分環境である中性からアルカリ性 pH 条件において行う。さらに、炭酸イオンを共存させた Zr/Th-OH-NO₃-CO₃ 系における溶解度を幅広い NaNO₃ 濃度条件下で測定する。炭酸イオン共存下での溶解度については、Altmaier らが 0.5 M NaCl 溶液における Th の溶解度を測定しており、Th(OH)(CO₃)₄⁵⁻、Th(OH)₂(CO₃)₂²⁻などが支配的な溶存種として提案されている[15]。



$$\beta_{114} = \beta_{114}^{\circ} (\gamma_{\text{Th}^{4+}}) (\gamma_{\text{OH}^{-}}) (\gamma_{\text{CO}_3^{2-}})^4 / \gamma_{\text{Th(OH)(CO}_3)_4^{5-}} \quad (1.2)$$



$$\beta_{122} = \beta_{122}^{\circ} (\gamma_{\text{Th}^{4+}}) (\gamma_{\text{OH}^{-}})^2 (\gamma_{\text{CO}_3^{2-}})^2 / \gamma_{\text{Th(OH)}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}} \quad (1.4)$$

ここで、 β_{114} および β_{122} は $I = 0.5$ における値、 β_{114}° および β_{122}° は $I = 0$ における値を示す。イオン強度補正法として、SIT を用いた場合、それぞれの溶存種の活量 γ は

$$\log \gamma_i = -z_i^2 D + \sum \varepsilon_{ij} m_j \quad (1.5)$$

と表される。ここで、 z_i はイオン i の電荷、 D はデバイヒュッケル項、 ε_{ij} はイオン相互作用係数、 m_j はイオン j のモル濃度を表す。式(1.5)に示されるように、生成する錯体の電荷の絶対値が大きければ、イオン強度の増加に伴って活量も大きく変化する。既報では、Th 溶解度の pH 依存性および CO_3^{2-} 濃度から錯体種の化学量論が求められているが、3 元系以上の複雑な系ではイオン強度依存性も錯体種を決定する際の情報になりえると考えられる。実験では、飽和濃度までの NaNO_3 溶液中でのジルコニウムおよびトリウム溶解度を測定し、関連する熱力学データおよびイオン強度補正パラメータを求めるとともに、4 価アクチノイドの既報値との比較、検討を行う。特に、飽和濃度に近い高イオン強度は、SIT の適用範囲外であり、高イオン強度まで適用が可能な Pitzer 法についても検討する。

コロイド種生成反応における硝酸塩影響の評価では、弱酸性から中性、アルカリ性 pH 条件下で生成する 4 価アクチノイドの加水分解によるコロイド種の異なる硝酸塩濃度溶液中での安定性に着目する。4 価アクチノイドの水酸化物コロイド種については、これまで 0.1 ~ 1.0 M NaClO_4 溶液中における見かけの溶解度を異なる孔径のフィルターを用いてろ過することにより粒径分布を求め、nm サイズの化学種が数カ月に及ぶ実験期間を通して溶液中に安定に存在していることを示した[12,13]。また、4 価トリウムの水酸化物コロイドに関しては、限外ろ過および遠心沈降法による見かけの溶解度の違いから検討が行われており、0.5 ~ 5 M NaCl 溶液中においてコロイド種が長期にわたって溶液中に存在することを示唆されている[14]。このようなコロイド種の存在は、見かけの溶解度を増加させ、核種移行パラメータとしての溶解度設定の際に、高い設定値を与える原因となっているが、その安定性の原因はこれまで明らかにされていない。コロイド種の粒径分布を調べるとともに、コロイド種の凝集や成長に関わる表面の状態についても調べる必要があると考えられる。

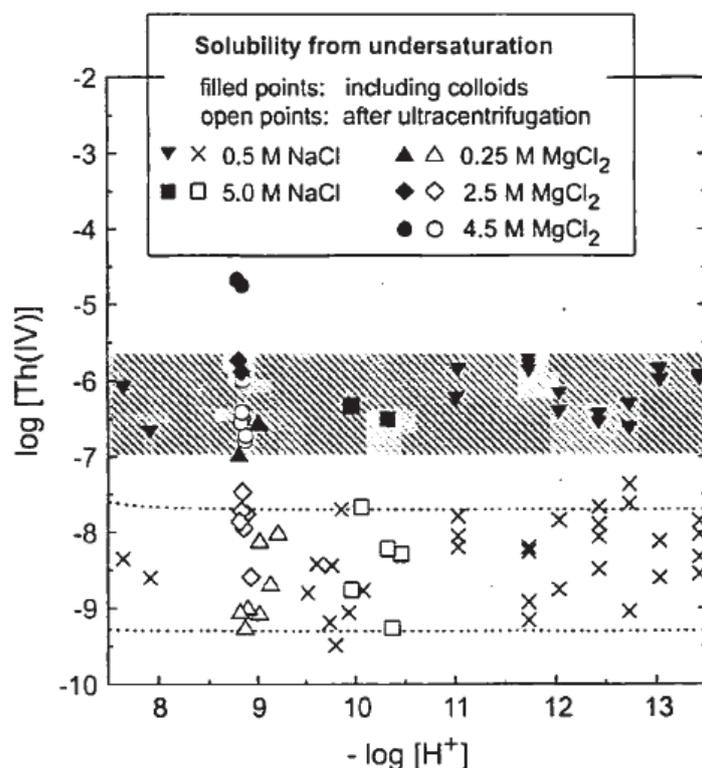


図6 NaCl および MgCl₂ 溶液中における Th(OH)₄(am)溶解度 [14]

そこで、本研究では、異なる NaNO₃ 溶液条件下における 4 価アクチノイド水酸化物のコロイド種のゼータ電位に着目する。ゼータ電位はコロイド粒子が液体中を移動する際の滑り面の電位であり、コロイド粒子が凝集する際の指標となる値である。

コロイド粒子(半径 a)がその電気二重層の厚さ ($1/\kappa$) に比べて十分に大きい場合 ($a \gg 1/\kappa$)、電気泳動移動度とゼータ電位の関係を Smoluchowski の近似式で表すことができる。粒子を大きな平板とみなし、粒子に加えられる力を考えると、液体からの粘性力と電場からの力が挙げられる。他に粒子の運動により引きつられて動く、粒子周囲の拡散電気二重層に働く力-対イオンが多いため粒子の運動を妨げる向きに働く力や、拡散電気二重層が粒子に完全に追従できず、旧対象からずれてしまうために生じる力(緩和効果)が考えられるが、電気二重層の厚さ ($1/\kappa$) が粒子半径 a に比べて十分に小さく、また測定する系でのゼータ電位が 60mV 以下で緩和効果を無視できるため、これらは無視し、粘性力と電場からの力とのつり合いのみを考える。電気泳動する粒子の周りの液体の速度 v について、以下の 1 次元 Navie-Stokes の式を導くことができる。

$$\eta \frac{d^2v}{dx^2} + \rho(x)E = 0 \quad (1.6)$$

粒子表面であるすべり面での液体の速さは 0 ($v(0)=0$)、粒子から無限に離れたところでの速度は $-V$ ($x \rightarrow \infty$ で $v(x) \rightarrow -V$)、さらに粒子から無限に離れたところでの速度勾配は 0 である。平板の表面電位は ϕ_0 とし、粒子表面から十分に離れた場所での電位は 0 に近づく。これらの境界条件のもとで式(1.6)を積分すると以下のようなになる。

$$\eta [v(x) + V] - \epsilon_0 \epsilon_r \phi(x) E = 0 \quad (1.7)$$

式(1.7)で $x=0$ とおき、すべり面での電気泳動移動度 $u=V/E$ と電位との関係を求めると、以下のようなになる。

$$u = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\eta} \phi_0 \quad (1.8)$$

多くの場合、表面電位 ϕ_0 をゼータ電位 ζ で置き換えることにより Smoluchiwski の近似式が得られ、最も広く用いられている電気泳動の式である。25°Cの水中では $\epsilon_r = 78.5$ 、 $\eta = 0.89$ mPa となる。

本研究では、NaNO₃ 溶液における 4 価水酸化コロイドのゼータ電位 ζ を測定するとともに、ゼータ電位 ζ の熱力学的な解釈を試みる。これまでの研究では、単核の加水分解種をユニットとするポリマーモデルによりコロイド種の粒径分布が説明できることを示してきた[12,13]。単核の加水分解種は、溶解度積や加水分解定数などの熱力学データを用いて表すことができ、本研究では、その集合体であるコロイド種のゼータ電位の熱力学的な解釈の可能性について検討する。溶液中でのコロイド種の挙動を表す指標となるゼータ電位 ζ について、熱力学的な解釈が可能であれば、コロイド種の生成や挙動予測に向けた重要な知見になると考えられる。

酸化還元反応における硝酸塩影響の評価では、プルトニウムを対象とし、高濃度までの硝酸塩溶液下での酸化還元挙動について、電位-pH 図に基づいた熱力学的な考察を進める。

2. 平成 26 年度実施内容

本年度は、次年度において計画している高イオン強度下での 4 価アクチノイドの錯生成反応に関連する文献の調査を行い、これまでの知見を整理した。また、高イオン強度下での実験に先立ち、幅広いイオン強度下での既知試料の pH および Eh を測定し、それぞれの測定値のイオン強度補正について検討した。

2.1 既往研究の文献調査

本研究で対象とする 4 価ジルコニウム、トリウムおよびプルトニウムについて、硝酸錯体および炭酸錯体の熱力学データに関する調査を行った。

2.1.1 ジルコニウム

ジルコニウム硝酸錯体については、これまでの文献でいくつか報告値があり、NEA-TDB では、既往データの再解析により推奨値を求めている[15]。ただし、既往データにおけるイオン強度は 2 または 4 M であり、 $I = 0$ における推奨値は既報値からの外挿値となっている。このとき、イオン強度は SIT により補正されており、 $\epsilon(\text{Zr}^{4+}, \text{ClO}_4^-) = 0.89 \pm 0.10$ および $\epsilon(\text{H}^+, \text{NO}_3^-) = 0.07 \pm 0.01$ から $\epsilon(\text{ZrNO}_3^+, \text{ClO}_4^-) = (0.88 \pm 0.11) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ と求められている。



同様に既往データを再解析することにより 1:2 錯体である $\text{Zr}(\text{NO}_3)_2^{2+}$ の錯生成定数の値も求められている[15]。再解析の中で存在の確定に至らなかった 1:3 錯体および 1:4 錯体については、推奨値を求めている。なお、 $\text{Zr}(\text{NO}_3)_2^{2+}$ のイオン相互作用係数は、 ZrCl_2^{2+} のイオン相互作用係数と同じ値 $((0.84 \pm 0.10) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1})$ と仮定されている。Zr と硝酸イオンの 1:1 錯体と Zr と塩化物イオンの 1:1 錯体では、それぞれのイオン相互作用係数が類似した値であることから、Zr と硝酸イオンの 1:2 錯体において ZrCl_2^{2+} のイオン相互作用係数を用いて構わないとされている。



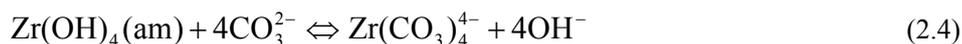
一方、Zr の炭酸錯体に関する文献は多くなく、特に定量的な解析が行われているものは少ない。また、このうちの多くは $\text{K}_2\text{CO}_3/\text{KHCO}_3$ 又は $\text{KOH}/\text{K}_2\text{CO}_3$ 系で行われた実験である。NEA-TDB では、Zr の加水分解が非常に強いことから Zr-OH-CO_3 の 3 元錯体生成の可能性を指

摘しているが、 CO_3^{2-} がZrに対して過剰に存在している条件では、 $\text{Zr}(\text{CO}_3)_4^{4-}$ が支配的な溶存種とし、既報値の再解析から錯生成定数を求めている[15]。



このときのイオン強度依存性については、既報値では1種類のイオン強度 ($I = 1$) しかなく、イオン相互作用係数 $\epsilon(\text{NH}_4^+, \text{Zr}(\text{CO}_3)_4^{4-})$ の値は、 $\epsilon(\text{Na}^+, \text{U}(\text{CO}_3)_4^{4-}) = -0.09 \pm 0.20$ の値を用いている。 $\text{Zr}(\text{CO}_3)_4^{4-}$ の濃度は炭酸イオン濃度に対する傾きが4であり、 CO_3^{2-} 濃度の低下とともにその寄与は急激に減少する。 $\text{Zr}(\text{CO}_3)_4^{4-}$ の錯生成定数は、 CO_3^{2-} が過剰に存在する実験条件下で設定されているため、比較的低濃度の CO_3^{2-} 濃度下でZr溶解度の熱力学計算を行うと、Zrの炭酸影響は表れない評価となる。一方、4価アクチノイド(An(IV))では、An(IV)-OH- CO_3 の3元錯体 (An(IV)(OH) $_2$ (CO_3) $_2^{2-}$ など) が支配的な炭酸錯体として考えられており、この場合、炭酸錯体濃度の CO_3^{2-} 濃度に対する傾きが緩やかであるため、比較的低い CO_3^{2-} 濃度下でも炭酸錯体が存在することになる。第2次TRUレポートにおける溶解度評価の設定の中で、4価アクチノイドでは炭酸錯体が支配的な溶存化学種と設定されているのに対して、ジルコニウムでは炭酸錯体が表れず加水分解種のみとなっているのは、このような炭酸錯体の設定の仕方に違いがあるためであると考えられる。

$\text{Zr}(\text{CO}_3)_4^{4-}$ の生成反応を下式のような $\text{Zr}(\text{OH})_4(\text{am})$ からの溶解反応として考えた場合、



SITを用いれば、イオン強度 I_m における平衡定数 ($K_{1,0,4}$) は、 $I = 0$ における値 ($K_{1,0,4}^0$) を用いて下式で表される。

$$\begin{aligned} \log K_{1,0,4} &= \log K_{1,0,4}^0 + 4D \\ &\quad -I_m \left(\epsilon \left(\text{Zr}(\text{CO}_3)_4^{4-}, \text{Na}^+ \right) + 4 \cdot \epsilon \left(\text{OH}^-, \text{Na}^+ \right) - 4 \cdot \epsilon \left(\text{CO}_3^{2-}, \text{Na}^+ \right) \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

一方、4価アクチノイドで設定されているような1:2:2の3元錯体の生成を仮定した場合、イオン強度 I_m における平衡定数 ($K_{1,2,2}$) は下式で表され、両者のイオン強度依存性は大きく異なる。



$$\begin{aligned} \log K_{1,2,2} &= \log K_{1,2,2}^\circ - 2D \\ &- I_m \left(\varepsilon(\text{Zr(OH)}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}, \text{Na}^+) + 2 \cdot \varepsilon(\text{OH}^-, \text{Na}^+) - 2 \cdot \varepsilon(\text{CO}_3^{2-}, \text{Na}^+) \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Zrの炭酸錯体のような複雑な溶存化学種が想定されるような系では、従来のpH依存性やCO₃²⁻濃度依存性だけでなく、イオン強度依存性も溶存化学種を推定する際の重要な知見になると考えられる。

2.1.2 トリウム

Thの硝酸系については、いくつか報告がなされているが、NO₃⁻はThにとって弱い配位子であり、Th-NO₃系のデータを硝酸錯体の形成を仮定して扱うべきか、硝酸錯体の形成を仮定せず、Th⁴⁺とNO₃⁻のイオン相互作用として扱うべきかを判断するのは難しい[7]。Th硝酸錯体の錯生成定数を扱った既報データの中でNEAはNeck et al. 2006の溶媒抽出法による硝酸錯体の錯生成定数測定の実験データ[5]を採用しており、その結果に基づき、1:1および1:2硝酸錯体の錯生成定数の値が選定されている。同文献では3 Mまでの異なるNaNO₃濃度範囲において実験が行われており、錯生成定数とともにイオン強度依存性の解析からSITにおけるイオン相互作用係数の値も求められている。



$$\varepsilon(\text{Th}^{4+}, \text{NO}_3^-) = \varepsilon(\text{Th}^{4+}, \text{ClO}_4^-) = (0.70 \pm 0.10) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \quad (2.10)$$

$$\varepsilon(\text{Th(NO}_3)_3^{3+}, \text{NO}_3^-) = \varepsilon(\text{Th(NO}_3)_3^{3+}, \text{ClO}_4^-) = (0.56 \pm 0.14) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \quad (2.11)$$

$$\varepsilon(\text{Th(NO}_3)_2^{2+}, \text{NO}_3^-) = \varepsilon(\text{Th(NO}_3)_2^{2+}, \text{ClO}_4^-) = (0.43 \pm 0.18) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (2.12)$$

NEA-TDBでは、このときのイオン相互作用係数の値はTh⁴⁺とNO₃⁻の錯生成を仮定した中で求められた値であり、OH⁻やCl⁻との硝酸溶液中での錯生成定数を決定する際に用いられるε(Th⁴⁺, NO₃⁻) = (0.31 ± 0.12) kg·mol⁻¹とは区別して用いられるべきであると述べられている[7]。

関連するThとNO₃⁻の相互作用に関する既報文献としてBernardo et al., 2011[6]およびNeck et al. 2006[5]の詳細を以下で紹介する。

Bernardo らは、マイクロカロリメトリーを用いて 4 価トリウム硝酸錯体の錯生成定数 (25°C、*I*=1.0) を求めた[6]。このとき、1 : 1 トリウム硝酸錯体 (Th(NO₃)₃³⁺) の錯生成反応は吸熱反応であり、エントロピーが大きく寄与していることが示されるとともに、他の 4 価アクチノイドとの比較から Th(NO₃)₃³⁺は内圏型の錯体であることを示唆している。実験では、4 価トリウムの過塩素酸塩の母溶液は硝酸トリウムから調製されている。まず、硝酸トリウム (Th(NO₃)₄·xH₂O) を純水に溶解した後、水酸化ナトリウムを加えることによりトリウム水酸化物 (Th(OH)₄(s)) を沈殿させた。純水で数回沈殿を洗浄した後、過塩素酸に溶解し、さらに過塩素酸ナトリウムによりイオン強度 (*I*) を *I*=1.0 に調整している。このとき、トリウム濃度は EDTA 滴定により求めている。マイクロカロリメトリーは 25°Cにおいて恒温マイクロカロリメータ (Thermometric 2277 Thermal Activity Monitor, nanoWater model) により毎秒 1 μl の速度で行われている。滴定回数を 25 回とし、滴定ごとに反応セル内で発生する熱量 (Q_{exp}) を測定した。滴定の際の混合熱 (Q_{mix}) を予め実験により求めておくことで、トリウムと硝酸イオンの錯生成による熱量 (Q_{complex}) を求めている。異なる硝酸イオン濃度の溶液 ([NO₃⁻]=375–900 mM) に対して、[Th⁴⁺]=50 mM, [H⁺]=100 mM および[ClO₄⁻]=1000 mM の混合溶液を滴定し、滴定ごとの熱量を測定した結果が示されている。硝酸イオン濃度が増加するとともに熱量は負の方向に大きくなり、反応が吸熱であることが指摘されている。このときの熱量変化から 1 : 1 トリウム硝酸錯体の生成を以下のように仮定し、その錯生成定数および反応エンタルピーの値を決定している。



$$\beta_1 = 0.22 \pm 0.11 \quad (2.14)$$

$$\Delta H_1 = 5.2 \pm 2.7 \quad \text{kJ/mol} \quad (2.15)$$

また、熱量滴定におけるパラメータである N_{bar} (Th(IV)に配位している硝酸イオンの平均個数) を求め、同実験 ([NO₃⁻] < 1 M) では、N_{bar}の値が 0.2 以下と小さく、トリウムと硝酸イオンの錯生成が非常に弱いものであることを述べている。

次に、イオン強度 1.0 で求めた錯生成定数の値を SIT により無限希釈溶液での値 (*I* = 0) に補正している。このとき、イオン強度補正係数 ε は、NEA-TDB Vol. 11 の値を用いている。*I* = 0 での値は、log β₁⁰ = 0.86 ± 0.30 となり、この値は NEA-TDB Vol. 11 での報告値 (log β₁⁰ = 1.3 ± 0.2) と比較するとかなり小さい値である。著者らはこの原因として、同実験での溶液は 0.375 M NaNO₃ / 0.625 M NaClO₄ の混合溶液であることを述べ、NaNO₃のみや

NaClO₄ のみの場合とイオン強度補正係数が異なるためと考えている。さらに、反応エンタルピー ($\Delta H_1 = 5.2 \text{ kJ/mol}$) が正の値であることおよびエントロピー ($\Delta S_1 = 5 \pm 3 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$) の値が小さいことから Th(NO₃)³⁺ は内圏型の錯体であると述べている。ウランやネプツニウム、プルトニウム等の 4 価アクチノイドに関しては、硝酸錯体の錯生成反応のエンタルピーやエントロピーは報告されていないが、錯生成定数の報告値の間には、一致した傾向が表れており、著者らはトリウムと同様、他のアクチノイドも内圏型の硝酸錯体を形成している可能性を指摘している。また、硝酸イオンの配位の仕方については、3 価ランタニドや 4 価プルトニウムで硝酸イオンは 2 座配位しているとの報告があることから、4 価トリウムについても硝酸イオンは 2 座配位しているのではないかと考えられている。

一方、Neck らは 10-50% TBP-n-ドデカン溶媒抽出法から NaClO₄、NaNO₃、NaCl 溶液中における Th⁴⁺ の活量を測定し、SIT におけるパラメータであるイオン相互作用係数について詳細な検討を行っている[5]。中程度のイオン強度までに範囲において、イオン相互作用係数を $\varepsilon(\text{Th}^{4+}, \text{ClO}_4^-) = 0.70 \pm 0.06 \text{ kg/mol}$ 、 $\varepsilon(\text{Th}^{4+}, \text{NO}_3^-) = 0.31 \pm 0.12 \text{ kg/mol}$ と求めている。得られた $\varepsilon(\text{Th}^{4+}, \text{NO}_3^-)$ の値は NEA-TDB で選定されている値 ($0.11 \pm 0.02 \text{ kg/mol}$) とはかなり異なっている。一方、NaCl 溶液では 3 M NaCl 以下の条件では分配係数が小さく、SIT による補正を行うことができなかったが、2.5~5.0 M NaCl での平衡定数は、NEA-TDB によるイオン相互作用係数 $\varepsilon(\text{Th}^{4+}, \text{Cl}^-) = 0.25 \pm 0.03 \text{ kg/mol}$ により良く再現することができている。錯生成していない M^{Z+} イオンの各溶液中でのイオン相互作用係数 $e(\text{M}^{Z+}, \text{NO}_3^-)$ 、 $e(\text{M}^{Z+}, \text{Cl}^-)$ 、 $e(\text{M}^{Z+}, \text{ClO}_4^-)$ の間には線形関係が成り立っており、また、4 価アクチノイドのイオン相互作用係数の値はそれぞれのイオン半径に依存することが示されている。

彼らの実験では、溶媒抽出実験における水相は、0.05~3.0 M NaNO₃、0.05~3.0 M NaClO₄ および 1.0~5.0 M NaCl 溶液とし、それぞれ 0.01 または 0.02 M の HClO₄、HNO₃、HCl の酸濃度とした。また、初期トリウム濃度は 0.001~0.002 M (NaNO₃ および NaClO₄ 溶液)、または 0.008 M (NaCl 溶液) とした。有機相は 10-50% TBP と n-ドデカンを混合し、予め 0.1 M NaOH と純水により洗浄している。溶媒抽出では、水相および有機相 2ml ずつを接触させ、約 20 分間振とうした後、遠心分離により 2 相を分けている。水相中のトリウム (Th-232) 濃度は ICP-MS により定量しており、有機相中のトリウム濃度は逆抽出を行った後、同様に ICP-MS による濃度測定を行っている。

NaClO₄、NaNO₃ および NaCl 溶液中の Th⁴⁺ の TBP による抽出反応は以下の式で表される。



ここで X⁻ = ClO₄⁻, NO₃⁻, Cl⁻ である。このとき、抽出分配反応の平衡定数 K' および *K' は以下の式で定義される。

$$K' = \frac{[\text{ThX}_4(\text{TBP})_n(\text{org})]}{[\text{Th}^{4+}(\text{aq})][\text{X}^-(\text{aq})]^4[\text{TBP}(\text{org})]^n} \quad (2.17)$$

$$*K' = K'[\text{TBP}(\text{org})]^n = \frac{[\text{ThX}_4(\text{TBP})_n(\text{org})]}{[\text{Th}^{4+}(\text{aq})][\text{X}^-(\text{aq})]^4} \quad (2.18)$$

SITによるイオン強度補正を行う場合、イオン*i*の活量 γ_i は以下の式で表され、

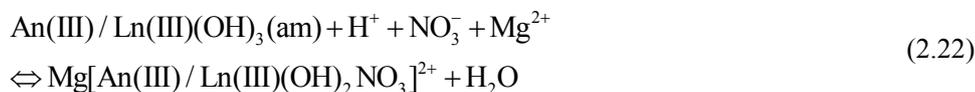
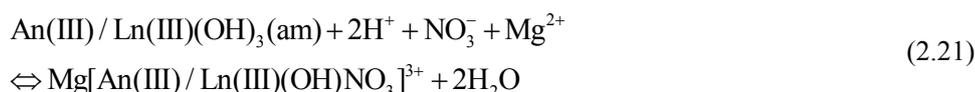
$$\log \gamma_i = -z_i^2 D + \sum \varepsilon_{ij} m_j \quad (2.19)$$

$I=0$ における平衡定数を $*K^\circ$ とすると

$$\log *K^\circ = \log *K' + 20D - \varepsilon(\text{Th}^{4+}, \text{X}^-) m_{\text{X}^-} - 4\varepsilon(\text{Na}^+, \text{X}^-) m_{\text{Na}^+} \quad (2.20)$$

と表せる。異なる濃度の NaClO₄、NaNO₃ および NaCl 溶液中での抽出分配平衡定数 $*K'$ を求めることにより、イオン相互作用係数の値を決定している。

また、再処理により発生する硝酸塩により、処分場で高濃度の硝酸塩溶液条件 (> 1 M) が形成されることを背景とした 3 価アクチノイド/ランタノイドの溶解度研究も行われている[4]。この研究では、NaCl-NaNO₃ 系、MgCl₂-Mg(NO₃)₂ 系および CaCl₂-Ca(CO₃)₂ 系における Nd(III) および Cm(III) の溶解度および溶存化学種の同定を行っている。Nd(OH)₃(am) の溶解度試験では、0.1~6.02 M の NaCl-NaNO₃ 溶液、0.25~5.2 M の MgCl₂-Mg(NO₃)₂ 溶液および 2.91/4.02 M の CaCl₂-Ca(CO₃)₂ 溶液に、固相として Nd(OH)₃(am) を 6-12 mg 程度添加し、所定の期間後の pH および Nd 濃度を測定している。また、Cm(III) に対しては、~10⁻⁷ M の Cm(III) を含む 5.61/6.02 M の NaCl-NaNO₃ 溶液、0.25/4.1 M の MgCl₂-Mg(NO₃)₂ 溶液および 4.02 M の CaCl₂-Ca(CO₃)₂ 溶液を調製し、Cm(III) の TRLFS 測定を行っている。Nd(OH)₃(am) の溶解度試験では、NaCl-NaNO₃ 溶液および CaCl₂-Ca(CO₃)₂ 溶液において有意な硝酸影響は確認できていない。しかし、MgCl₂-Mg(NO₃)₂ 溶液では、pH 8-9 の領域において NO₃ 濃度 > 1.13 M の条件では、Nd(III) 溶解度が上昇しており、Mg-Nd-OH-NO₃ の溶存錯体が形成していると考えられた。Cm(III) の TRLFS 測定および EXAFS 測定の結果から、MgCl₂-Mg(NO₃)₂ 系のみ An(III)/Ln(III)-OH-NO₃ 錯体が形成している可能性が指摘されており、また、溶解度や EXAFS の配位子間距離などから Mg²⁺ イオンが錯体に関与しているとされている。そこで、著者らは MgCl₂-Mg(NO₃)₂ 系における錯生成反応として下記のような反応を考えている。



Thの炭酸錯体に関する報告はこれまでに幾つかなされており、中でも代表的なものが Altmaier et al. 2006である[16]。Na₂CO₃濃度を変えた溶液条件下でのTh溶解度を測定し、ThOH(CO₃)₄⁵⁻、Th(OH)₂(CO₃)₂²⁻が支配的な溶存種、その他Th(OH)₂(CO₃)(aq)、Th(OH)₃(CO₃)⁻、Th(OH)₄(CO₃)²⁻などが存在すると考えられている。NEA-TDB[7]では同データを採用しており、第2次TRUレポートにおいて設定されているThの支配的な溶存種であるThOH(CO₃)₄⁵⁻およびTh(OH)₂(CO₃)₂²⁻もこの報告に基づき設定されたものである。さらに、NEA-TDBでは、それぞれの化学種のSITにおけるイオン相互作用係数の値を報告している。

$$\varepsilon(\text{ThOH(CO}_3\text{)}_4^{5-}, \text{Na}^+) = (-0.25 \pm 0.20) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \quad (2.23)$$

$$\varepsilon(\text{Th(OH)}_2\text{(CO}_3\text{)}_2^{2-}, \text{Na}^+) = (-0.1 \pm 0.2) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \quad (2.24)$$

$$\varepsilon(\text{Th(OH)}_2\text{(CO}_3\text{)(aq)}, \text{Na}^+) = 0 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \quad (2.25)$$

$$\varepsilon(\text{Th(OH)}_3\text{(CO}_3\text{)}^-, \text{Na}^+) = (-0.05 \pm 0.20) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \quad (2.26)$$

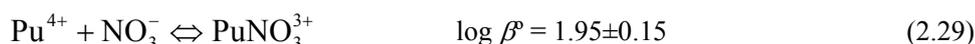
$$\varepsilon(\text{Th(OH)}_2\text{(CO}_3\text{)}_2^{2-}, \text{Na}^+) = (-0.1 \pm 0.2) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \quad (2.27)$$

$$\varepsilon(\text{Th(CO}_3\text{)}_5^{6-}, \text{Na}^+) = (-0.30 \pm 0.15) \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (2.28)$$

ただし、これらの値は低イオン強度 ($I = 0.1 - 0.4$) におけるデータまたは他の元素の値を引用したものであり、高イオン強度 (高濃度NaNO₃) 下での適用性について確認する必要がある。

2.1.3 プルトニウム

Pu(IV)の硝酸錯体に関する報告は、再処理等を背景としてこれまで数多く存在している。NEA-TDBでは文献値のレビューから以下の硝酸錯体の錯生成定数を選定値として推奨している[5]。



Puの溶液実験およびそのデータの取り扱いについて最も困難かつ重要であるのがPuの酸化状態の維持である。Puの炭酸系についても同様であり、酸化還元反応を考慮に入れた

Pu-OH-CO₃系の包括的な熱力学モデルはこれまで構築されていない。NEA-TDBではPu(VI)、Pu(V)およびPu(IV)それぞれの炭酸錯体の既報データを整理、レビューを行っている[5]。ここでは、特にPu(IV)の炭酸錯体について以下に述べる。

CO₃²⁻存在下でのPu(IV)の炭酸錯体については、Capdevilaらが分光測定からPu(CO₃)₄⁴⁻およびPu(CO₃)₅⁶⁻の存在を示唆しており[17]、下式で表される逐次錯生成定数の値を求めている。



NEAでは同データの再解析を行い、逐次錯生成定数の値を求めている。

$$\log K_5^\circ = -(1.36 \pm 0.09) \quad (2.31)$$

さらに、Raiらは幅広いpHおよびCO₃濃度およびイオン強度下でのPuO₂(am)溶解度試験を行い、Pu炭酸錯体 (Pu(CO₃)₅⁶⁻およびPu(OH)₂(CO₃)₂²⁻) の錯生成定数およびイオン強度補正パラメータの値 (Pitzerパラメータ) を報告している[18]。

2.2 高イオン強度下における pH および Eh 測定

前節までで述べたような様々な NaNO_3 濃度条件下での溶解度測定および電位-pH 図による考察を行うためには、幅広いイオン強度下で pH および酸化還元電位 (Eh) 測定を行う必要がある。

図 7 に Ag/AgCl 複合 pH 電極の模式図を示す。電極間の電位として測定される値 (U) は、図に示すように試料溶液とガラス膜間のポテンシャル (U_1)、ガラス膜と内部電解液間のポテンシャル (U_2)、内部電解液と参照電極間のポテンシャル (U_3)、銀-塩化銀間のポテンシャル (U_4) および隔膜のポテンシャル (U_5) の和として表される。

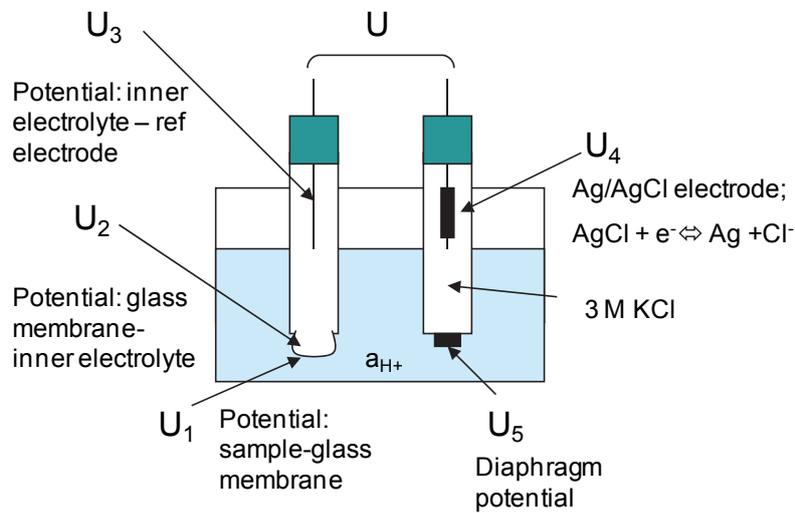


図 7 複合 pH 電極の模式図

ここで、 U_2 、 U_3 、 U_4 および U_5 は電解質溶液の濃度が同じときは一定値であり、 U は以下のような式で表される。

$$\begin{aligned} U &= U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5 \\ &= U_0 + 2.303 * RT / zF * \log (a_{\text{H}^+}) \end{aligned} \quad (2.32)$$

ここで、 U_0 は一定値、 a_{H^+} は水素イオンの活量を表す。水素イオン濃度を x_{H^+} とすれば、 a_{H^+} は活量係数 γ_{H^+} を用いて

$$a_{\text{H}^+} = \gamma_{\text{H}^+} x_{\text{H}^+} \quad (2.33)$$

となり、試料溶液の pH 測定値 U (V) と水素イオン濃度 (pHc) の間には以下の式が成り立つ。

$$\begin{aligned}
 U &= U_0 + 2.303 \cdot RT / zF \cdot \log (\gamma_{\text{H}^+} x_{\text{H}}) \\
 &= U_0 + 2.303 \cdot RT / zF \cdot \log (\gamma_{\text{H}^+}) - \text{pHc} \\
 &= U_0 + 0.059 \cdot (\log (\gamma_{\text{H}^+}) - \text{pHc})
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

電極内部のポテンシャルである U_0 と活量係数 γ_{H^+} に関わる項は、イオン強度一定の下で一定値とされる。同項の値はイオン強度によって変化するため、高イオン強度下において溶液の pHc を測定する場合は、予め上記の補正項の値を求める必要がある。

一方、図 8 に Ag/AgCl 複合白金 Eh 電極の模式図を示す。Eh 電極の場合、電極間の電位として測定される値 (U) は、試料溶液に含まれる物質 Pt 電極表面における酸化還元電位 (U_1)、銀-塩化銀間のポテンシャル (U_4) および隔膜のポテンシャル (U_5) の和として表される。

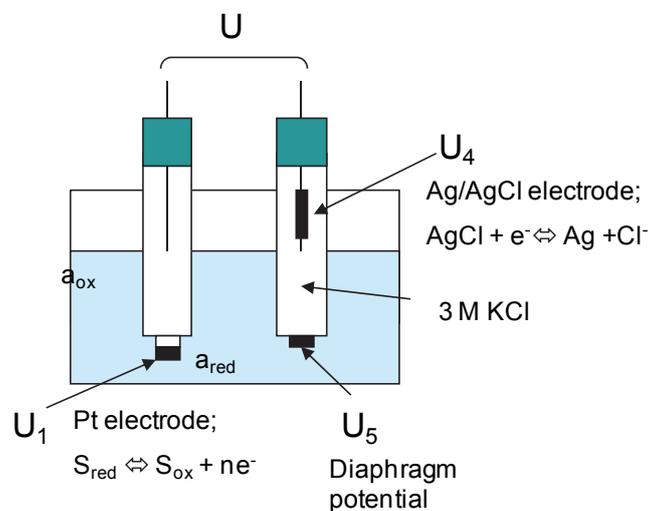


図 8 Eh 電極の模式図

pH 電極と同様、 U_4 および U_5 は電解質溶液の濃度が同じときは一定値であり、 U は以下のような式で表される。

$$\begin{aligned}
 U &= U_1 + U_4 + U_5 \\
 &= U_0 + 2.303 * RT / zF * \log (a_{\text{ox}} / a_{\text{red}})
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

ここで、 U_0 は一定値、 a_{ox} および a_{red} はそれぞれ酸化剤、還元剤となる物質の活量を表す。式(2.35)に示されるように、高イオン強度下では、系の酸化剤、還元剤となる物質によって Eh 測定値の補正項は変化する。安定な酸化剤、還元剤の組み合わせである $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ を例にとり、測定を行った結果を後述する。

pH 測定実験では、堀場製作所社製の pH メータ D-53 および温度補償型 pH 複合電極 (9615-10D) を用い (図 9)、予め pH 標準液 (pH 4 および 7, 堀場製作所社製) を用いて校正した。 HNO_3 標準液 (1.0 M, 和光純薬工業) および NaOH 標準液 (1.0 M、0.1 M, 和光純薬工業) を用いて、水素イオン濃度 (pHc) が pHc = 1, 2, 3, 11, 12 および 13 となる試料溶液を調製した。このとき、試料溶液のイオン強度を硝酸ナトリウム (99%, 和光純薬工業) により $I=0.1, 0.5, 2.5$ および 5.0 に調整した。また、比較のため、水素イオン濃度 (pHc) を HCl 標準液 (1.0 M、0.1 M, 和光純薬工業) および NaOH 標準液により、イオン強度を



図 9 高イオン強度下における pH 測定

塩化ナトリウム（99%，和光純薬工業）により調製した試料も作成した。NaNO₃ 溶液および NaCl 溶液における pH 測定値（mV）と水素イオン濃度（pHc）の関係を図 10 および 11 に示す。

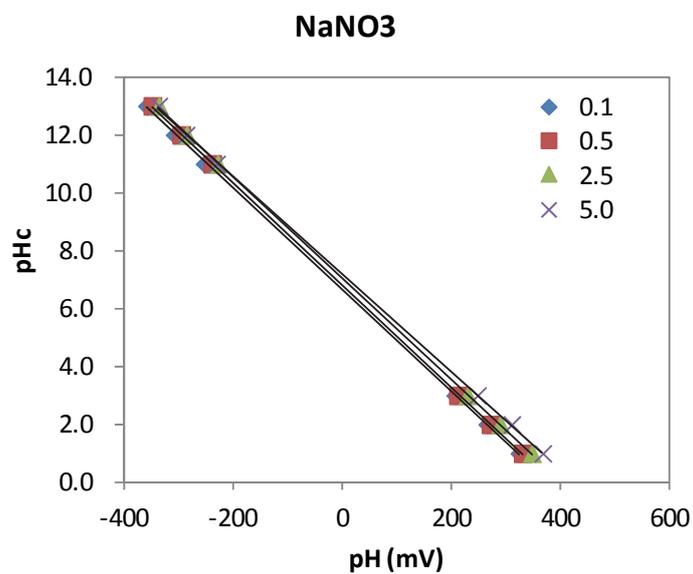


図 10 NaNO₃ 溶液中の pH 測定値および pHc の関係

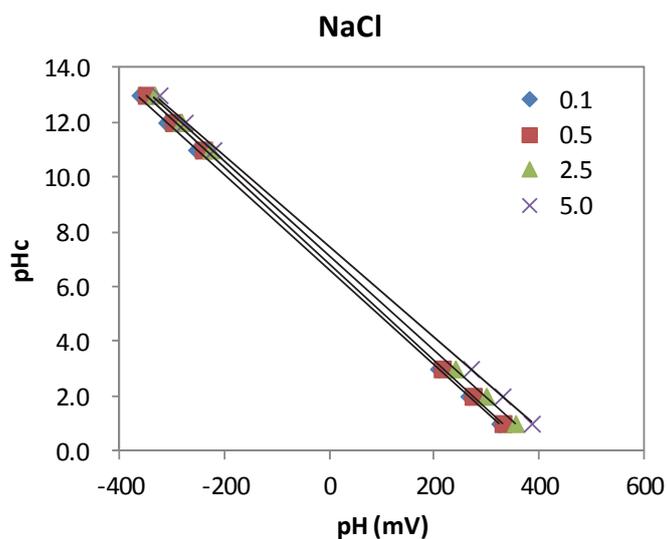


図 11 NaCl 溶液中の pH 測定値および pHc の関係

それぞれの溶液において pH 測定値と pHc の間には良い線形関係が見られており、得られた結果から各イオン強度における pH 測定値から pHc への換算係数を求めた。

Eh 測定実験では、メトローム社製の pH メータ 826 型および複合白金リング電極を用いた (図 12)。試料溶液はフェロシアン化カリウム ($K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$, 99%, 和光純薬工業) およびフェリシアン化カリウム ($K_3[Fe(CN)_6]$, 99%, 和光純薬工業) の混合溶液とし、それぞれの濃度を 1 mM および 0.1 mM とした。所定量の $HNO_3/NaOH$ を加えることにより pH を 3~7 に調整し、 $NaNO_3$ により試料溶液のイオン強度を 0.1、1.0 および 5.0 とした。また、比較のため、 $NaCl$ 溶液を用いて同様の試料溶液を調製し、Eh 値を測定した。



図 12 高イオン強度下における pH 測定

各イオン強度において測定された結果を図 13 に示す。測定 Eh の値 (mV) は下式により pe 値に変換した。

$$pe = (Eh + 208) / 1000 / 0.059 \quad (2.36)$$

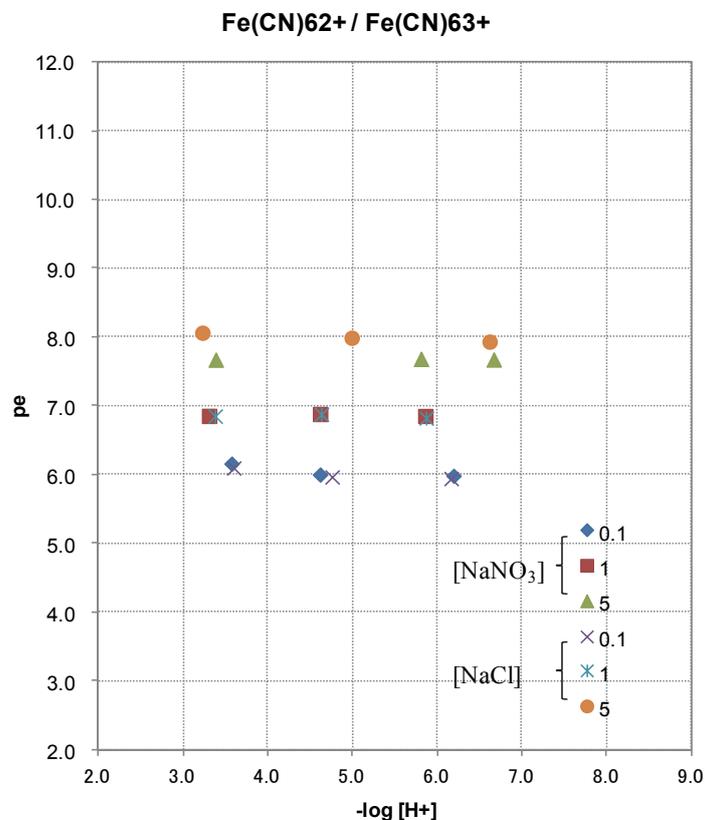


図 13 高イオン強度下における $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の pe 測定値

得られた pe の値は pH に対してはほぼ一定であり、イオン強度の増加とともに大きな値を示している。また、 NaNO_3 系と NaCl 系の値は、概ね近い値となった。

$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ および $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の酸化還元反応およびその標準酸化還元電位[19]は下式のように表される。

$$E = E^\circ + 0.0592 (\log K + \log \gamma(\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}) - \log \gamma(\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-})) \quad (2.37)$$

$$E^\circ = 0.37 \text{ V} \quad (2.38)$$

ここで、本実験では、それぞれイオンの濃度比より、 $K = [\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}] / [\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}] = 0.1$ とする。 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ および $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の活量を SIT により表すと、

$$\log \gamma = -Z_M^2 + \varepsilon * I_m \quad (2.39)$$

$\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ のイオン相互作用係数を-0.17[5]、 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ のイオン相互作用係数を-0.3 と仮定す

ると $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の酸化還元電位 E のイオン強度依存性は図 14 のように表される。

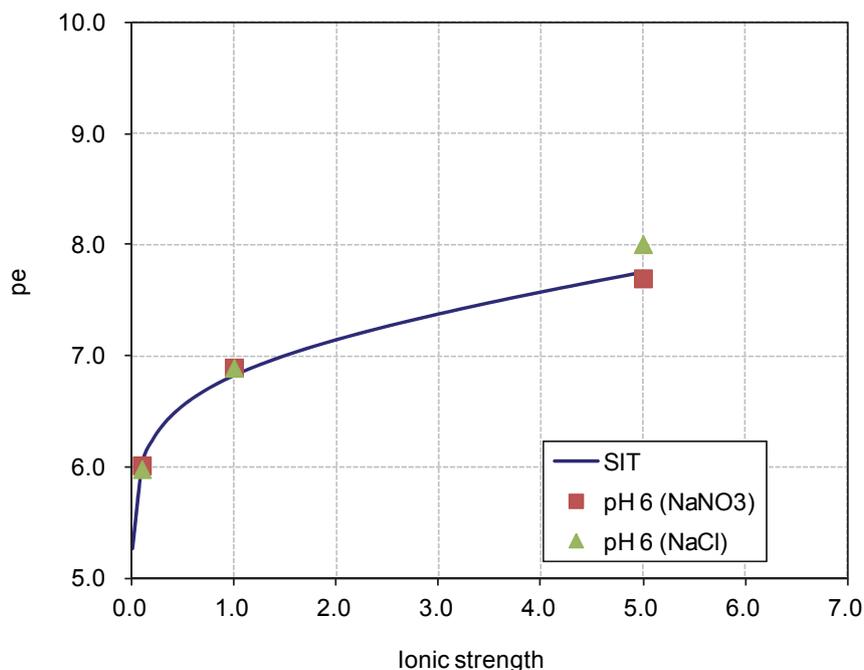


図 14 高イオン強度下における $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の pe のイオン強度依存性

異なるイオン強度下における $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の酸化還元電位 (pe) の実験値は、 E° の報告値[19]を SIT により補正することにより非常に良く再現できることが分かった。 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ のような比較的電荷が高いイオン同士の酸化還元反応の場合、 Eh 測定値に対する (2.35) 式の右辺第 2 項 (活量補正項) の寄与が U_0 に比して大きかったためである可能性が考えられる。また、図 13 および 14 に示すように、 NaCl 溶液および NaNO_3 溶液で $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の酸化還元電位の測定値にほとんど違いは見られなかった。

2.3 まとめ

TRU 廃棄物処分の安全評価における硝酸塩影響評価の信頼性向上に資するため、本研究では、高イオン強度下でのアクチノイドの溶解度を決定する酸化還元反応、錯生成（硝酸／その他配位子）およびコロイド生成挙動に着目し、高濃度までの幅広い濃度範囲の NaNO_3 溶液に対して適用可能な熱力学モデルの構築を目指す。本年度は、関連する既往知見を整理するとともに、高イオン強度下での実験・測定に向けた予備実験として、高濃度の NaNO_3 および NaCl 溶液下での pH 測定および Eh 測定を行い、pH については実測値から水素イオン濃度 (pHc) を決定するための換算係数を各イオン強度において求めた。Eh については、安定な酸化剤、還元剤の組み合わせである $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の Eh 値を低濃度から高濃度までの NaNO_3 および NaCl 溶液下で測定し、そのイオン強度依存性について考察した。 $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} / \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ の場合、Eh 値のイオン強度依存性は SIT により良く再現できることが分かった。一方、 NaNO_3 および NaCl で Eh 測定値に顕著な違いは見られなかった。次年度は本年度の結果を元に、高イオン強度 (NaNO_3) 下での溶解度実験を開始し、錯生成反応およびコロイド生成挙動に及ぼす NaNO_3 濃度の影響について検討を進める。

参考文献

- [1] 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書―第2 次TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ―, JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
- [2] 日本原子力研究開発機構: 平成 24 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術「硝酸塩処理・処分技術高度化開発―6 カ年研究成果の取りまとめ―」報告書 (2013).
- [3] 原子力発電環境整備機構: 地層処分低レベル放射性廃棄物に関わる処分の技術と安全性―付録資料―, NUMO-TR-10-04 (2011).
- [4] Karlsruhe Institute of Technology, KIT Scientific Reports, Annual Report of Institute of Nuclear Waste Disposal 2013, KIT-SR7664 (2013).
- [5] Neck, V., Altmaier, M., Fanghänel, Th.: Ion interaction (SIT) coefficients for the Th⁴⁺ ion and trace activity coefficients in NaClO₄, NaNO₃ and NaCl solution determined by solvent extraction with TBP. *Radiochim. Acta* 94, 501 (2006).
- [6] Bernardo, P. D., Zanonato, P., Rao, L., Bismondo, A., Endrizzi, F.: Interaction of thorium(IV) with nitrate in aqueous solution: medium effect or weak complexation?. *Dalton Trans.*, 40, 9101 (2011).
- [7] Rand, R., Fuger, J., Grenthe, I., Neck, V., Rai, D.: *Chemical Thermodynamics of Thorium*, In: *Chemical Thermodynamics* (Eds.: F. J. Mompean et al.) *Vol. II*, Elsevier, North-Holland, Amsterdam (2009).
- [8] Guillaumont, R., Fanghänel, Th., Fuger, J., Grenthe, I., Neck, V., Palmer, D., Rand, M.: *Update on the Chemical Thermodynamics of Uranium, Neptunium, Plutonium, Americium and Technetium*, In: *Chemical Thermodynamics* (Eds.: F. J. Mompean et al.) *Vol. 5*. Elsevier, North-Holland, Amsterdam (2003).
- [9] Kitamura, A., Doi, R. and Yoshida, Y. (2014): Update of JAEA-TDB: Update of Thermodynamic Data for Palladium and Tin, Refinement of Thermodynamic Data for Protactinium, and Preparation of PHREEQC Database for Use of the Brønsted-Guggenheim-Scatchard Model, JAEA-Data/Code 2014-009.
- [10] Pitzer, K. S.: *Activity Coefficients in Electrolyte Solutions*. Chap. 3, CRC Press, Boca Raton, FL (1991).
- [11] Cho, H., Walther, C., Roche, J., Neck, V., Denecke, M. A., Dardenne, K., Fanghänel, Th.: Combined LIBD and XAFS investigation of the formation and structure of Zr(IV) colloids. *Anal. Bioanal. Chem.* 383, 28 (2005)
- [12] Sasaki, T., Kobayashi, T., Takagi, I., Moriyama, H.: Solubility measurement of zirconium(IV) hydrous oxide. *Radiochim. Acta* 94, 489 (2006).
- [13] Kobayashi, T., Sasaki, T., Takagi, I., Moriyama, H.: Solubility of Thorium(IV) in the Presence of Oxalic and Malonic Acids. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 46, 1085 (2009).

- [14] Altmaier, M., Neck, V., Fanghänel, Th.: Solubility and colloid formation of Th(IV) in concentrated NaCl and MgCl₂ solution. *Radiochim. Acta* 92, 537 (2004).
- [15] Brown, P., Curti, E., Grambow, B., Ekberg, C.: *Chemical Thermodynamics of Zirconium*, In: *Chemical Thermodynamics* (Eds.: F. J. Mompean et al.) *Vol. 8*. Elsevier, North-Holland, Amsterdam (2005).
- [16] Altmaier, M., Neck, V., Müller, R., Fanghänel, Th.: Solubility of ThO₂·xH₂O(am) in carbonate solution and the formation of ternary Th(IV) hydroxide-carbonate complexes. *Radiochim. Acta* 92, 537 (2004).
- [17] Capdevila, H., Vitorge, P., Giffaut, E., Delmau, L.: Spectrophotometric study of the dissociation of the Pu(IV) carbonate limiting complex, *Radiochim. Acta*, 74, 93 (1996).
- [18] Rai, D., Hess, N. J., Felmy, A. R., Moore, D. A., Yui, M., Vitorge, P., A thermodynamic model for the solubility of PuO₂(am) in the aqueous K⁺-HCO₃⁻-CO₃²⁻-OH⁻-H₂O system, *Radiochim. Acta*, 86, 89 (1999).
- [19] Rock P.A.: The standard oxidation potential of the ferrocyanide-ferricyanide electrode at 25 ° and the entropy of ferrocyanide ion. *J. Phy. Chem.*, 70, 576 (1968).

研究報告 5

地層処分の性能評価の精緻化を目指した
薄片状雲母を用いた核種の収着メカニズム
に関する基礎的研究

東北大学 大学院工学研究科

千田 太詩

目 次

1 研究の背景と目的.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 本研究の背景.....	1
1.3 本研究の目的および概要.....	3
1.4 本研究の実施計画.....	4
2 平成 26 年度の実施内容.....	5
2.1 試験内容.....	5
2.1.1 Eu(III)の収着試験.....	5
2.1.2 蛍光分光分析.....	8
2.1.3 SIMS 分析.....	9
2.2 結果および考察.....	9
2.2.1 Eu 収着試験結果および考察.....	9
2.2.2 蛍光分光分析の予備検討.....	12
2.2.3 SIMS 分析の予備検討.....	15
3 平成 26 年度のまとめと次年度の予定.....	19
引用文献.....	19

1. 研究の背景と目的

1.1 はじめに

本研究では、地層処分システムの天然バリアに豊富に含有する雲母鉱物について、薄片状雲母を用いた核種取り込みを実験的手法により調べ、雲母が有する異方性が核種収着挙動に与える影響について基礎的知見を取得する。さらに、取得データをもとにした拡散・収着を考慮した二次元数値解析を実施するとともに、雲母薄片への核種収着に重要となる因子を整理し、核種移行評価への反映手法を提示する。

1.2 本研究の背景

高レベル放射性廃棄物の処分方法として、わが国を含め各国では、地下 300 m 以深の深地層に埋設する地層処分が計画されている。地層処分では、ガラス固化体やオーバーパック、緩衝材といった人工バリアと、これらが埋設される安定した母岩による天然バリアを組み合わせた多重バリアシステムを構築することで、放射性核種の閉じ込め性能を担保する。天然バリアの働きを期待する母岩としては、わが国では結晶質岩系と堆積岩系が分布しており、各々について水理特性や核種移行遅延効果といった観点から活発な研究が進められている。このうち結晶質岩系については、わが国に広く分布する花崗岩が主に研究対象とされており、地層処分の成立性を示した「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性－地層処分研究開発第 2 次取りまとめ」の安全評価解析におけるレファレンスケースとしても花崗岩の物性データが使用されている[1]。花崗岩は、堆積岩系と比較して堅牢性が高く安定な状態を保てる等の長所に加え、核種移行を遅延させる核種収着性能についても注目されており、花崗岩自体のみならず、花崗岩を構成する各鉱物種についての核種収着データも図 1 のように取得されている[2]。図 1 に示すように、花崗岩の構成鉱物の一つである黒雲母は高い核種収着性を示すことが知られており、花崗岩の有する核種移行遅延効果への寄与が大きいことから、本研究では黒雲母に対する放射性核種の収着挙動に着目する。一方で、既往の核種収着データのほとんどは一定粒径に粉碎された粉末試料を用いた収着試験によって取得されているため、実際の地下環境における鉱物の物理的および化学的特性を十分に反映できていない場合があることを考慮する必要性が指摘されている[3]。

本研究で注目する黒雲母は、一般に $\text{K}(\text{Mg,Fe,Al})_3(\text{Si,Al})_4\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$ の化学式で表され、(001)に平行な劈開が著しいケイ酸塩鉱物(粘土鉱物)である。黒雲母は、シリカ四面体およびアルミナ等の八面体からなる層状構造をとり、層間には交換性の高い陽イオン(K)が入る。この交換性イオンを有するために陽イオン核種を収着しやすく、地層処分を対象とした研究のみならず、福島第一事故後の Cs 移行挙動評価においても黒雲母の Cs 収着性能が着目されている。しかし、層状構造をとり劈開が著しい黒雲母についても、これまでの

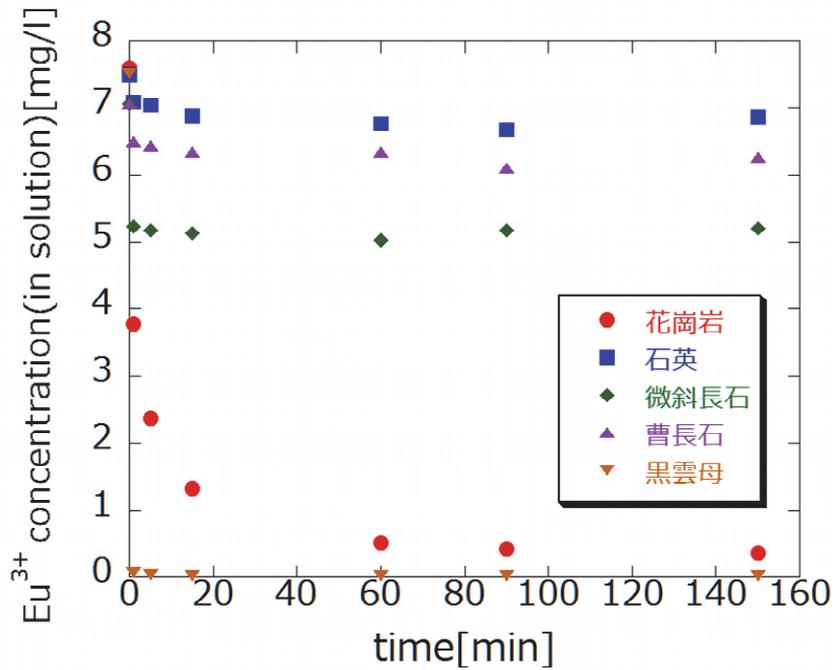


図1 花崗岩および主要構成鉱物へのユウロピウムの収着挙動[2]
 (液固比 10 mL/g, pH 4, Eu(III)濃度 7.5 ppm, いずれも粒径 75-150 μm の粉末)

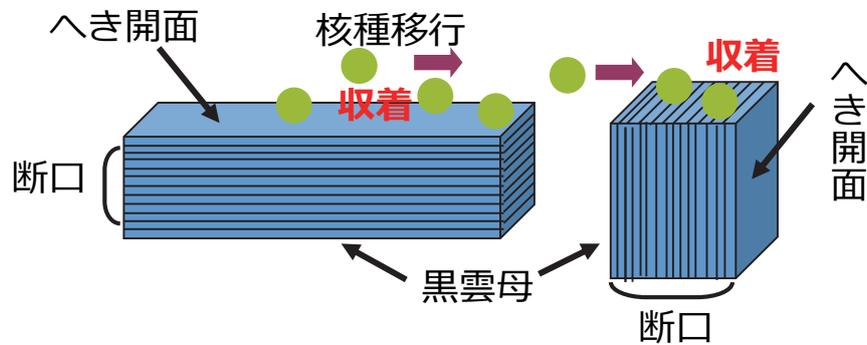


図2 黒雲母の異方性による収着挙動の違い

研究では前述したように粉砕した粉末試料を用いて核種との相互作用が調べられている[4]. 黒雲母は図2に示すように劈開面と断口部があり, 細かく粉砕した場合, 黒雲母は図2中の断口部の割合が非常に大きくなる. このような粉末試料では, 黒雲母の断口部における核種との相互作用が主に収着挙動を支配する. 実際の地下環境において黒雲母は粉砕状態ではなく, 花崗岩内に薄片の形状で含有すると想定され, 図2に示すように核種収着はその劈開面および断口部で異なると考えられる. 地下水に接する花崗岩表面では黒雲母の劈開面および断口部がランダムに現れることを考慮すれば, その大部分が断口部となる粉末試料による評価が天然バリア中の核種収着性能を適切に表現しているとは言い難い. そこ

で本研究では、より実環境の状態に近い、粉碎していない薄片状の黒雲母を用いた核種収着挙動検討を実施する。特に、黒雲母薄片の断口部においては、核種が収着した後に雲母層間を拡散して内部へ浸入することが予想され、これを考慮した収着挙動評価が重要となる。これまでの粉末試料による黒雲母の核種収着評価ではこのような鉱物内への拡散効果は考慮されておらず、花崗岩表面での黒雲母断口部への核種収着に加えて層状構造内部への拡散が生じるのであれば、さらなる核種遅延効果が花崗岩に期待される。この効果は、花崗岩表面においては確率的には劈開面より断口部が現れる頻度が高い予想されることから、雲母内拡散の核種遅延効果への寄与は大きいと考えられる。このような黒雲母の異方性を適切に核種移行評価に取り込むことは、処分システムの核種閉じ込め性能の説明性向上に資する。

これまで花崗岩および黒雲母について述べてきたが、実際の地下環境においては、地下水と接触している花崗岩表面が熱水等により変質している場合も想定される。水みちが形成され熱水変質を受けた花崗岩表面では、本研究で注目する黒雲母は層状ケイ酸塩鉱物である緑泥石(*Chlorite*, $(Mg_5Al)(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$ (*Clinochlore*))への変質が確認されており、加えて花崗岩に豊富に含有する長石類の変質により生成した雲母鉱物の一種である絹雲母(*Sericite*, $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$)が花崗岩表面を覆うことも報告されている[5-7]。このような熱水に起因する変質は、花崗岩がマグマから固結した後に熱水が花崗岩表面や鉱物粒界に接することにより生じると予想され、固結後に生じた比較的新しい亀裂(水みち)以外の地下水接触面では広く分布する可能性がある。本研究では、核種収着挙動の異方性に注目する黒雲母とともに、熱水変質によって生成する緑泥石や絹雲母についても核種収着挙動を調べ、比較検討する。

1.3 本研究の目的および概要

本研究では、雲母の異方性が核種収着挙動に与える影響について基礎的知見を取得し、核種移行評価への反映方法を併せて提示することにより、天然バリア中の核種移行評価(地層処分システムの性能評価)に資することを目的とする。この目的に向けて、実環境の状態に近いと考えられる薄片状の黒雲母を用いた核種の収着試験を軸に、種々の分析および数値解析を実施する。

収着試験は、固相として主に黒雲母薄片を用い、窒素雰囲気下でバッチ式により行う。収着元素には、Am の代替元素として Eu を主に使用するとともに、比較として Cs や Sr の使用も検討する(いずれも安定同位元素とする)。液固比や pH、経時変化等を主なパラメータとし、特に pH については Eu^{3+} として存在する pH 3 程度から実環境の地下水を想定した中性領域(pH 8, Eu の加水分解が生じる)の範囲を対象とする。液相中の Eu の濃度変化を誘導結合プラズマ発光分析装置(ICP-AES)による測定から得ることで黒雲母への収着性を調べる。さらに、黒雲母の層間の陽イオンが収着挙動に関連することが予想されるため、併せて層間の陽イオン(黒雲母では主に K)についても液相中の濃度変化を測定すること

によりイオン交換に関する知見を得る。

収着実験後の雲母薄片については、薄片内部への拡散に着目した分析を実施する。雲母を粉砕した試料では大部分が断口部となるとともに、核種の収着性は断口面の収着サイトを考慮した表面積で整理され得ると考えられる。しかし、雲母薄片では劈開面および断口部の収着に加え、断口部からの薄片内部への拡散が生じると予想され、雲母薄片の直接分析により内部拡散挙動を明らかにする。Eu イオンの化学状態については、蛍光分光分析により蛍光スペクトルや蛍光寿命から情報を取得する。また、TOF-SIMS では、イオンビームを用いたスパッタにより試料を二次イオン化して分析することによりスパッタ深さ方向の元素分布が得られるため、雲母薄片内部の Eu の収着および拡散を直接的に調べることが可能である。さらに、収着試験の固相として黒雲母の他に、同じ層状ケイ酸塩鉱物であるものの構造が若干異なる白雲母や金雲母、さらには花崗岩の熱水変質を考慮した緑泥石や絹雲母を用いることにより、収着および内部拡散挙動を比較検討する。

上述の実験的検討に加え、二次元の拡散・収着を考慮した数値解析を実施する。数値計算といくつかの実験結果の比較から雲母層間内の拡散係数を導出するとともに、異なる実験条件における収着実験での液相の元素濃度変化の再現を試みる。そして、これらの比較検討により、雲母薄片への核種収着挙動を評価する上で重要となる因子を整理し、核種移行評価への反映方法を提示する。

1.4 本研究の実施計画

本研究の各年度における実施計画を以下に示す。

(1)H26 年度実施内容

黒雲母薄片を用いた Eu の収着試験に着手する。Eu が Eu^{3+} として存在する pH 3 程度の酸性領域における Eu 濃度の経時変化から Eu の黒雲母への収着挙動を調べる。また、収着試験後の黒雲母薄片を用いた蛍光分光分析および SIMS 分析については、まず各々について本研究の収着実験条件における黒雲母薄片内の Eu 拡散挙動観察に適した分析条件の設定を目指す。蛍光分光分析では、Eu の蛍光スペクトルや蛍光減衰の測定条件を確認する必要がある。SIMS 分析では、イオンビーム選択や測定対象元素の質量干渉の有無を確認した上で分析を実施する。また、黒雲母が変質した緑泥石についても併せて収着試験に着手する。

(2) H27 年度実施内容

前年度に確認された収着試験系により、Eu の収着試験を継続する。前年度に開始した低 pH 領域の収着挙動に加え、当該年度では実際の処分環境における地下水 pH を想定した中性領域(pH 8 程度)における Eu の収着挙動について、液固比や Eu 濃度を考慮しながら経時変化を調べる。Eu は pH 6 以上では加水分解するためにコロイド状態の $\text{Eu}(\text{OH})_3$ を形成す

ることが知られており(Am も同様), この場合の黒雲母への収着を前年と同様に液相分析および蛍光分光分析や SIMS の固相分析によって検討する. また, 黒雲母薄片内の核種拡散・収着について一次元の数学モデルで解析を行い, 二次元数学モデルへの足がかりとする.

(3) H28 年度実施内容

前年度に引き続き, 収着試験を継続する. 当該年度では Eu の他に, 一価および二価の金属イオンであり, 線量評価においても寄与が大きい Cs や Sr を併せて収着元素として用いる収着試験を予定する. 三価の Eu と Cs および Sr の黒雲母への収着挙動は, 価数の違いから黒雲母層間におけるイオン交換や層間内の拡散挙動が異なることが予想され, これらを系統的に整理することを目指す. また, 前年度に着手した数学モデルによる解析について, より雲母薄片と核種の相互作用を実現現象に近い形で表現し得ると考えられる二次元数学モデルにより, 層間内の拡散係数評価, および取得した実験結果との比較検討を行う.

(4) H29 年度実施内容

前年度に引き続き, 収着試験および数学モデル解析を継続実施する. 収着試験については, 黒雲母以外に同じ雲母族である金雲母や白雲母についても収着試験を試みる(なお, 緑泥石や絹雲母については当該年度に限らず随時収着試験を実施する). いずれも黒雲母と同様に劈開性を示し核種収着に対しても異方性があるものと考えられるが, 層構造を構成する Si 四面体や Al や Mg 等の八面体の配置や層間距離が異なるため, これらに起因した収着挙動および層間の拡散挙動の違いを観察することが期待できる. また, 研究総括として, 当該年度までの雲母薄片を用いた収着挙動検討についてとりまとめ, 花崗岩を想定した天然バリアにおける核種遅延効果に影響が大きい因子を整理し, より実現現象に即した核種移行評価(処分システムの性能評価)に反映する手法を提示する.

2. 平成 26 年度の実施内容

平成 26 年度は, 黒雲母薄片および緑泥石を用いた Eu の収着試験に着手した. また, 収着試験後の黒雲母薄片を用いた蛍光分光分析および SIMS 分析について, 本研究の収着試験条件における黒雲母薄片内の Eu の拡散挙動観察に適した分析条件の設定を行った.

2.1 試験内容

2.1.1 Eu(III)の収着試験

本研究では, 黒雲母薄片および緑泥石への Eu(III)の収着についてバッチ式の収着試験を行った. 図 3 に収着試験の概要を示す. 鉍物試料はいずれも株式会社ニチカより購入し, 黒雲母は Nellore, Andhra, Pradesh, India 産の約 5 mm×6 mm 程度の薄片試料を, 緑泥

石は長崎県西彼杵群三和町蚊焼産の粉末試料(取扱が粉末試料のみであったため)を使用した. 図 4 は, 収着試験に使用する前の黒雲母および緑泥石の SEM(Scanning Electron Microscope)画像である. SEM は日立ハイテクノロジーズ社製 TM3030 を使用した. 図 4(a)では, 平滑な劈開部分と層状構造の端となる断口部が確認できる. また, 図 4(b)では, 粉末試料ということもあり黒雲母ほど明確では無いものの, 劈開の平滑な部分と層状構造を示す断口部が観察される粒子も見られる. 図 5 および図 6 は, EDS(Energy Dispersion X-ray Spectrometer, 前出の TM3030 に付属)による黒雲母および緑泥石の元素分布分析の結果である. いずれも, 化学式に示される含有する元素が一様に分布していることがわかる. Eu(III)溶液は, 和光純薬工業製の硝酸ユウロピウム(III)六水和物から調整した. また, その他の試薬についても和光純薬工業製の特級試薬を特に精製せずに使用した. 超純水は, 日本ミリポア社製 Millipore (Milli-Q Labo)により精製した. PPCO(ポリエチレン共重合)製の 10 mL ネジ蓋付遠沈管に硝酸および超純水で pH 3 に調整した 1.0 mM の Eu 溶液を

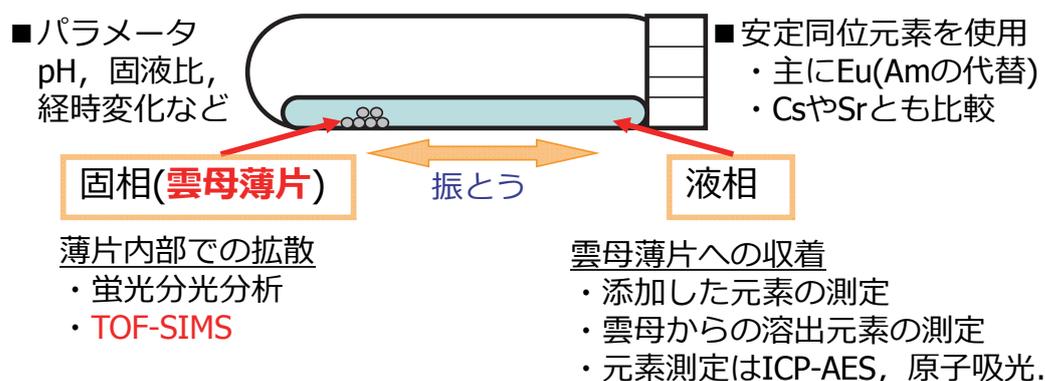


図 3 収着試験概要

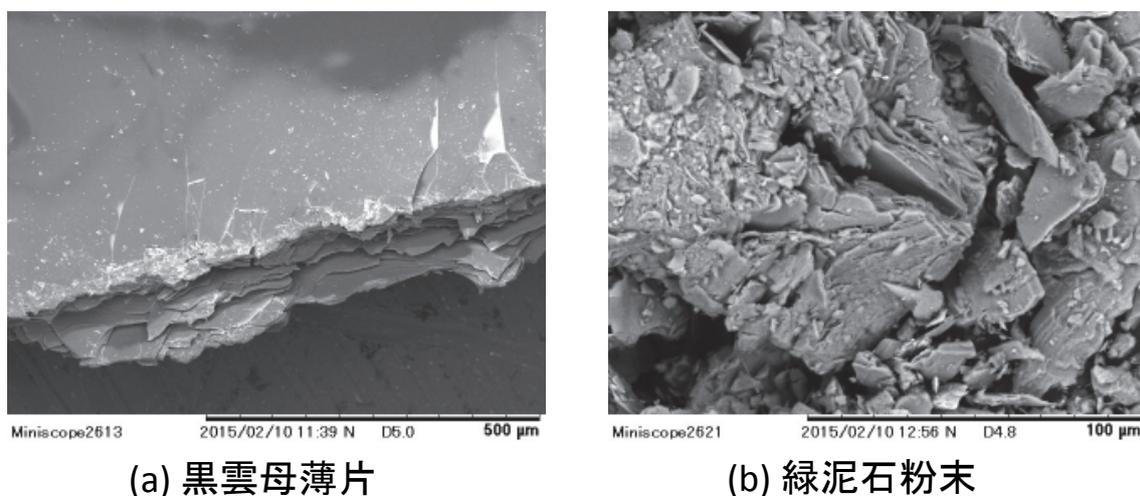


図 4 鉱物試料の SEM 観察画像

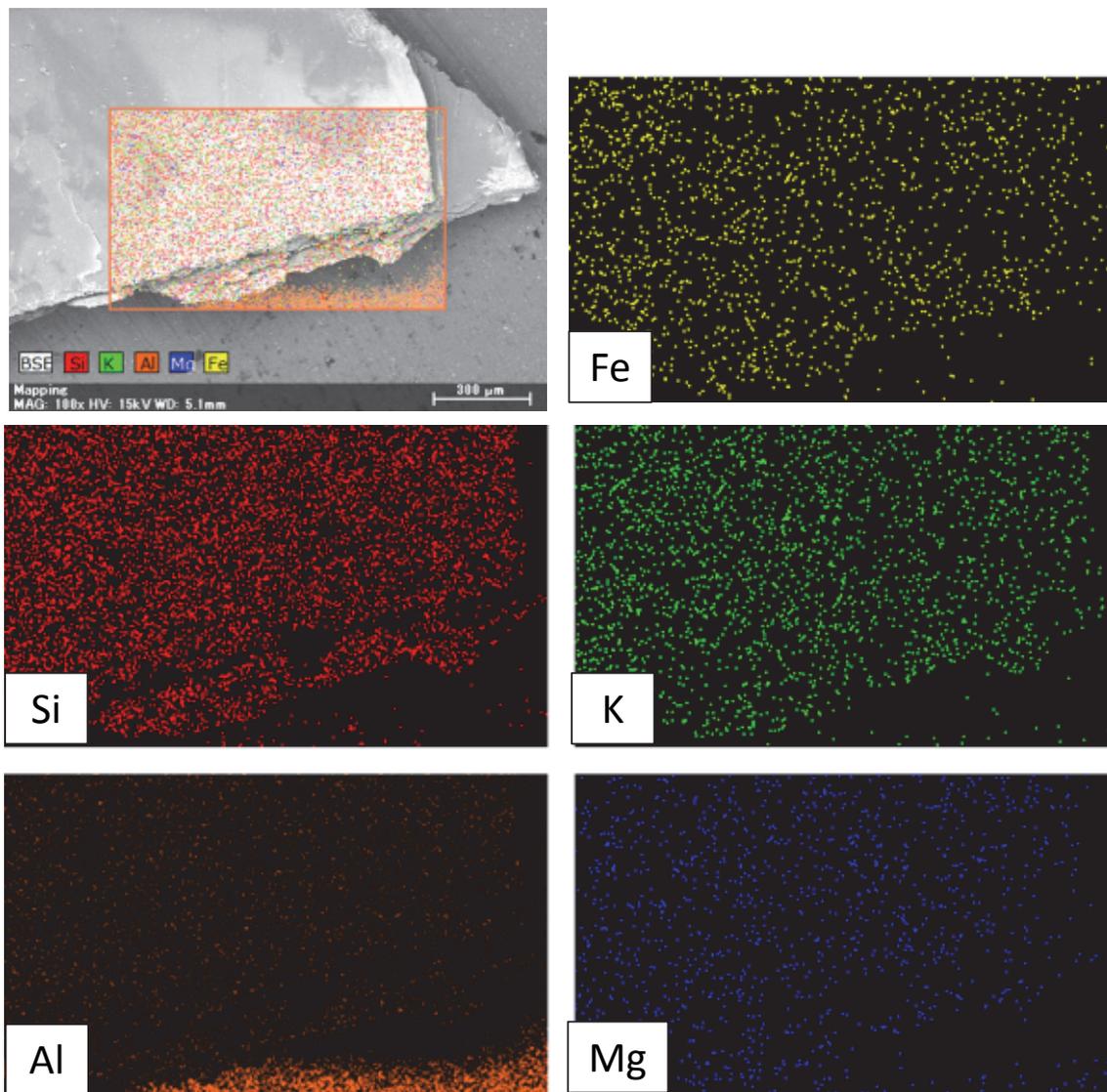


図5 EDS分析による黒雲母薄片の元素分布

6.0 mL, および液固比(mL/g)が 10 になるように秤量した黒雲母薄片を加えて密封後, 恒温振とう機(EYELA 社製 MMS-1)により 25°Cに保ち一週間に亘って振とうさせた. 遠沈管への添加から密封までは, 窒素雰囲気下の簡易グローブボックス内で行った. 実際の地下環境では pH 8 程度であるが, Eu(III)は pH 6 程度から加水分解することが知られており, 今年度は第一段階として加水分解を起こさない pH 範囲で収着試験を実施した.

所定時間振とう後, メンブレンフィルタ(ADVANTEC 社製, 孔径 0.45 μm)で固液分離し, 黒雲母については液相の Eu(III)および K の濃度を誘導結合プラズマ発光分析装置(ICP-AES, Seiko Instrument 社製, SPS7800)により定量した. K の測定は, 黒雲母の層間の交換性陽イオンである K が Eu(III)との交換により液相へ溶出することを想定したこと

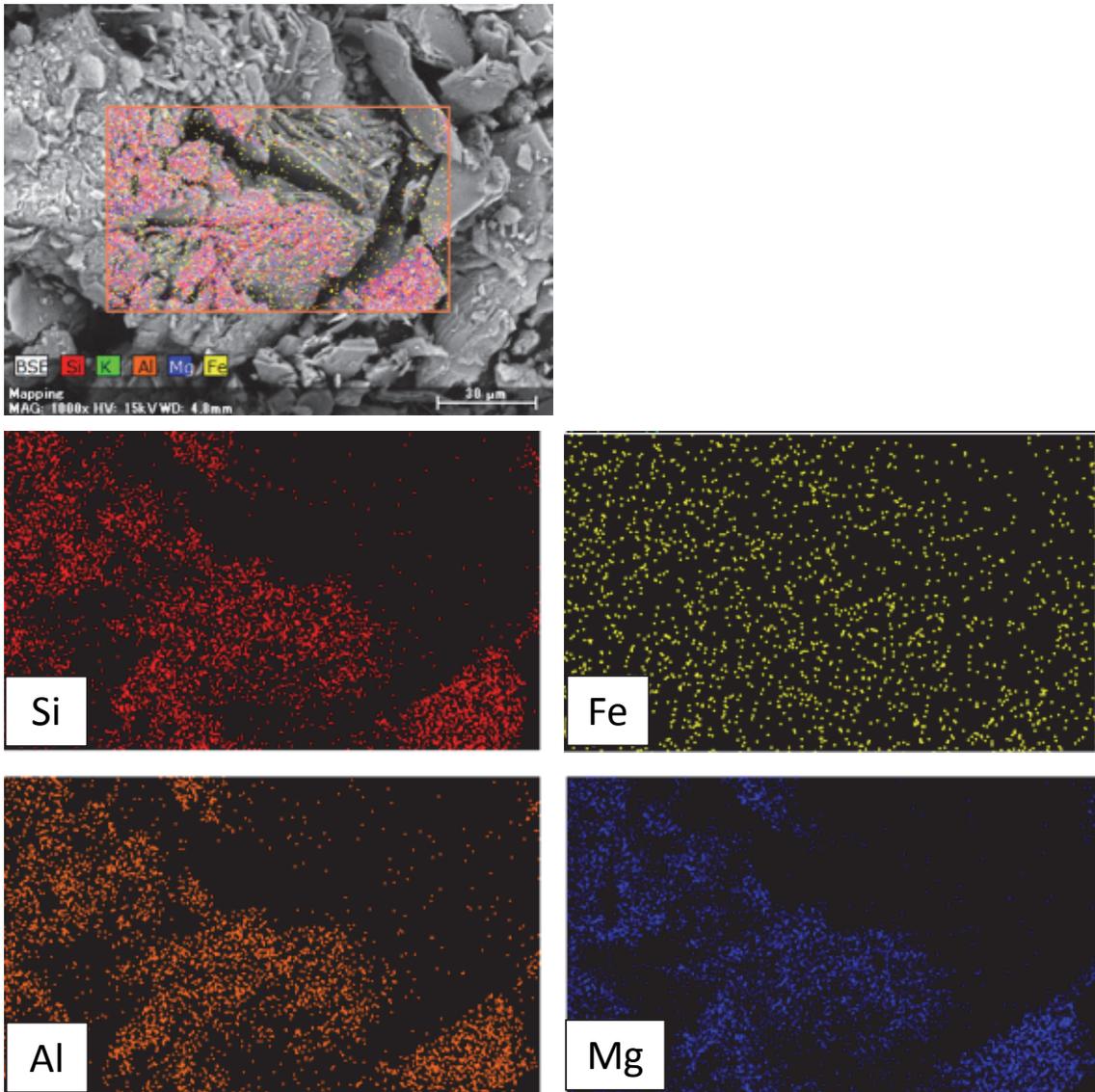


図6 EDS分析による緑泥石粉末の元素分布

による。また緑泥石については、Eu(III)測定と併せて、含有するMg, Fe, Al, SiについてICP-AESによる測定を行った。

2.1.2 蛍光分光分析

蛍光分光分析では、蛍光発光スペクトルの測定には分光蛍光光度計(日本分光社製FP-6500, 波長 394 nm キセノンランプで励起)を、蛍光の減衰挙動測定には高速蛍光寿命測定装置 FluoroCube(堀場製作所製 3000U, 波長 390 nm の LED で励起)を使用した。FluoroCube は、パルス幅の短い LED を光源としており、測定物質を励起してからスペクトルを測定するまでの時間を指定できる。このため、光源にキセノンランプを使用する分

光蛍光光度計とは異なり、散乱光の影響を受けない時間帯を指定して蛍光の減衰挙動を測定することが可能である。

Eu(III)溶液および黒雲母試料は 2.1.1 と同様のものを用い、Eu(III)に起因した蛍光発光スペクトルおよび蛍光寿命取得の予備検討を行った。なお、本研究では蛍光分光分析に供する溶液試料の調整には、純水(軽水)ではなく重水を使用した。これは、Eu イオンの周りに配位する水分子が重水である場合、蛍光発光のエネルギーが OH 振動によって消費されないために、水分子の影響を受けない状態で Eu(III)の蛍光分光分析が可能となることによる。

2.1.3 SIMS 分析

前述したように、黒雲母薄片の断口部に収着した Eu(III)は、層間内部へ拡散することが予想される。この挙動を直接分析するために、二次イオン質量分析装置(SIMS, 日立ハイテク社製 TOF.SIMS5(ION-TOF))を使用した。質量分析方法には、一定の加速電圧を印加された二次イオンが検出器までの一定距離を飛行する時間を計測し、質量分離する飛行時間型(TOF)が採用されている。2.1.1 と同じ試験条件(振とう期間のみ 1 日に変更)で Eu(III)を収着させた黒雲母薄片を固液分離後に真空デシケーター内で十分乾燥させ、SIMS 分析に用いた。本研究では、黒雲母薄片内部への Eu(III)の拡散を議論するため、図 7 に示すように Edge 1, Edge 2 および Center の三点で測定を行うこととした。

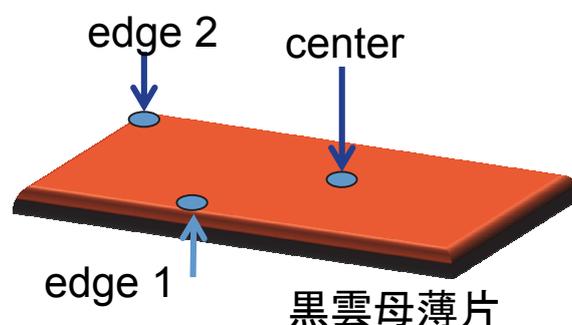


図 7 SIMS 分析時の測定ポイント

2.2 結果および考察

2.2.1 Eu 収着試験結果および考察

図 8 は、黒雲母薄片への Eu(III)収着の経時変化である。図 8 からわかるように、時間の経過に伴い液相中の Eu(III)濃度が減少しており、黒雲母薄片への収着が認められた。また、0 日から 1 日の間の Eu(III)濃度の減少は、その後の Eu(III)濃度減少と比較して急な変化を

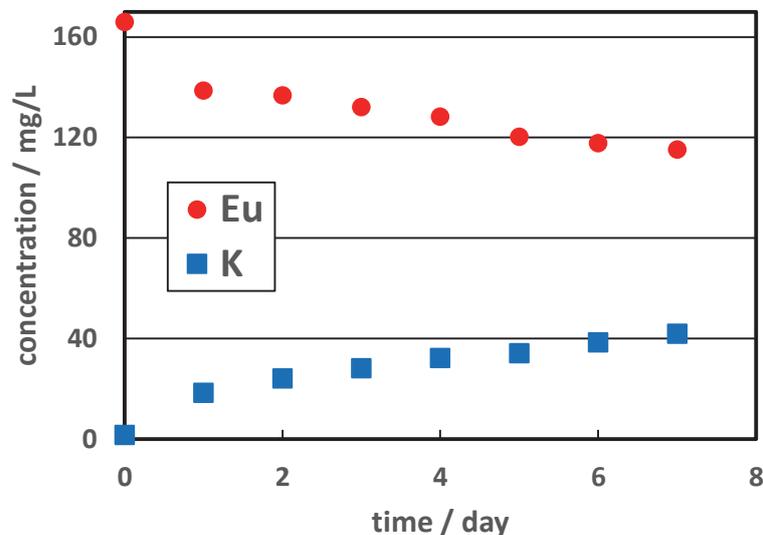


図 8 黒雲母薄片に対する Eu(III)吸着と K 溶出の経時変化

示した。これは、吸着試験開始直後には黒雲母薄片表面において吸着反応が速やかに起こり、その後は Eu(III)が黒雲母表面(主に断口部)から黒雲母内部へ拡散することにより、層間の新たな吸着サイトへの Eu(III)の吸着が生じているためと考えられる。一般的に、固相内の化学種の拡散は固相表面における吸着反応と比較して時間を要することから、固相表面への吸着が速やかに進んだ後は、液相中の Eu(III)の濃度減少は層間内の拡散過程に支配されて徐々に緩やかになると考えられる。図 1 に示した黒雲母粉末に対する Eu(III)の吸着と比較すると非常に緩やかな吸着反応であり、7 日間の試験期間においても未だ定常に達することなく吸着反応が継続することが特徴的である。一方、K 濃度は、液相中の Eu(III)濃度の減少に伴って増加した。ブランク試験として pH 3 の硝酸溶液に黒雲母を浸漬した場合には K の溶出は確認できなかったことから、黒雲母への Eu(III)の吸着に伴って交換性の陽イオンである K が液相へ溶出するものと考えられる。図 9 は、縦軸に液相中の K 増加量を、横軸に Eu(III)減少量をとったものである。Eu(III)と K がイオン交換する際、当量となるには一つの Eu^{3+} につき三つの K^+ を要する。図 9 中の実験値の線形近似から得られた傾きは 3.3 であり、これらのことから pH 3 における黒雲母薄片への Eu(III)の吸着は K とのイオン交換が支配的であると言える。

図 10 は、緑泥石粉末に対する Eu(III)吸着試験結果である。吸着試験開始直後に大きく Eu(III)の吸着が進み、その後 Eu(III)濃度の減少は緩やかになった。図 4(b)の SEM 観察で見られたように、緑泥石も粉末ではあるものの層状構造を有しており、黒雲母薄片と同様に固相表面への吸着後に内部への拡散現象が生じている可能性がある。まだ定常に達していないものの分配係数 K_d は 168 mL/g と大きい値が得られ、比較的高い吸着性能を示すと言える。ただし、図 1 より得られる黒雲母粉末の K_d は 2×10^4 mL/g であり、黒雲母と比べ

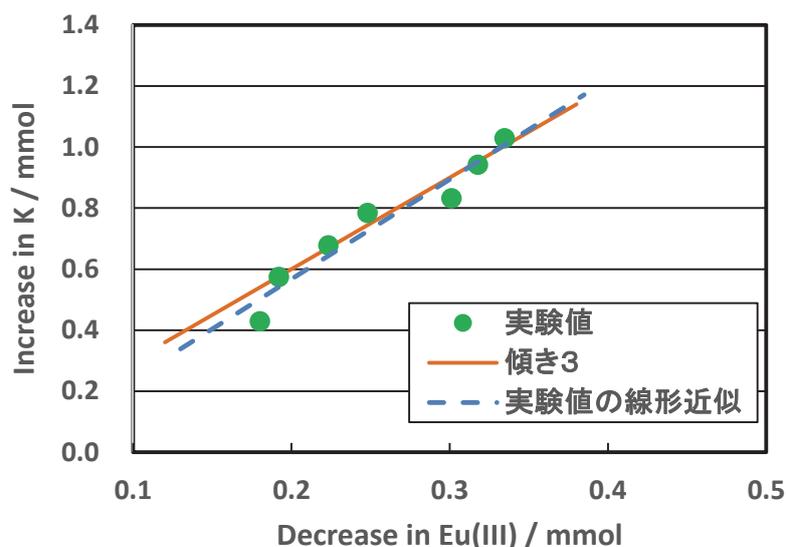


図9 黒雲母薄片に収着した Eu(III)と液相に溶出した K の関係

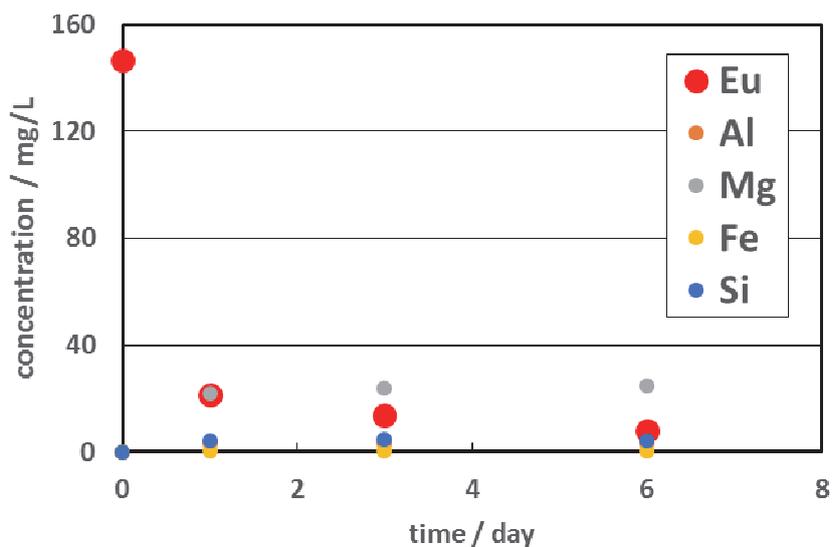


図10 緑泥石に対する Eu(III)収着と溶出元素の経時変化

ると核種収着性能が低くなる可能性がある。黒雲母薄片の収着試験と同様に、緑泥石への Eu(III)の収着も今回の試験期間では定常に至っていないため、今後、経時変化を含めて確認する必要があると思われる。加えて、今回は緑泥石粉末の粒径を特に整えていないため、比較検討には粒径を揃える必要があると考えられる。一方、緑泥石から浸出した元素としては、Mg が比較的多く溶出しており(30 ppm 程度)、Eu(III)の収着と何らかの関連がある可能性がある。しかし、Eu(III)を添加しないブランク試験においても Mg の有意な溶出があり(同じ溶液、液固比条件で 14 ppm 程度)、他の収着機構も考慮する必要がある。今後、黒雲母薄片でも予定している pH 依存性や異なる価数の化学種の収着試験を通して、緑泥石

の収着機構の検討を進める。

以上のように、黒雲母薄片への Eu(III)の収着試験に着手し、粉末試料とは異なる黒雲母薄片内部への Eu(III)の収着および拡散に起因すると考えられる収着挙動が確認された。次年度以降、本年度整備した試験系で種々のパラメータを反映させながら、データ取得を進める。また、熱水変質を考慮した緑泥石や絹雲母についても、併せて収着試験を行う。

2.2.2 蛍光分光分析の予備検討

本研究では、Eu(III)の蛍光発光スペクトルおよび蛍光の減衰挙動を取得することで、Eu(III)の黒雲母への収着状態を検討する。本年度は、蛍光発光分析の概要をまとめるとともに、本研究の試験条件および黒雲母共存下における蛍光分光分析の予備検討を行った。

Eu(III)の蛍光発光スペクトル

本研究では、Eu(III)の 4f 軌道内の電子遷移に起因した蛍光発光に注目した。図 11 は、水溶液中における Eu(III)の 4f 電子のエネルギー準位図である[8-10]。図 11 のように、波長 394 nm の光を照射した場合 4f 電子の軌道内遷移が起こり、 5L_6 準位へと励起される。励起された 4f 電子はエネルギーを赤外線放射または衝突エネルギーとして放出しながら 5D_0 準位に遷移し、そこから蛍光を発しながら基底準位へ遷移する。本研究における蛍光発光スペクトル取得では、比較的蛍光強度が大きい図 11 の $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ 遷移(618 nm)および $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ 遷移(592 nm)を含む範囲において測定を行うこととした。また、Eu(III)の 4f 軌道は Eu イオンの周辺の化学状態が変化しても電子のエネルギー状態がほとんど変化しないため、蛍光発光スペクトルのピーク波長位置もまたほとんど変わらないことも分析上の利点となる。これは、Eu(III)の 4f 軌道が 2 個の電子が占有する 5s 軌道と 6 個の電子が占有する 5p 軌道の内側に位置するため、外部からの化学的因子の影響があつたとしても 5s および 5p 軌道の殻の中の 4f 軌道は大きな相互作用を起こすことができないことによる。著者らは、既往の研究においてカルシウムシリケート水和物共存下の Eu(III)について蛍光分光分析を同様に行っており[11]、ここで述べた蛍光発光スペクトルが得られることを確認している。本年度は、収着試験における溶液条件、および黒雲母共存下においても同様に Eu(III)の蛍光発光スペクトルが取得できるかを確認した。

図 12 は、黒雲母薄片共存および非共存の 1.0×10^{-3} M の Eu(III)溶液の蛍光発光スペクトルである。黒雲母薄片共存のスペクトルは、液固比 10 mL/g になるように Eu(III)溶液に黒雲母薄片を加え、一週間振とうした後の試料を用いて取得した。図 12 中の Eu(III)溶液のみのスペクトルでは、前述の $^5D_0 \rightarrow ^7F_2$ 遷移(618 nm)および $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ 遷移(592 nm)のピークが確認できる。一方、黒雲母薄片共存条件では、592 nm のピークが非常に小さくなるとともに、618 nm のピークは確認できないスペクトルが得られた。592 nm のピークが見られることにより Eu(III)が存在することは確認できるものの、618 nm のピークが確認できな

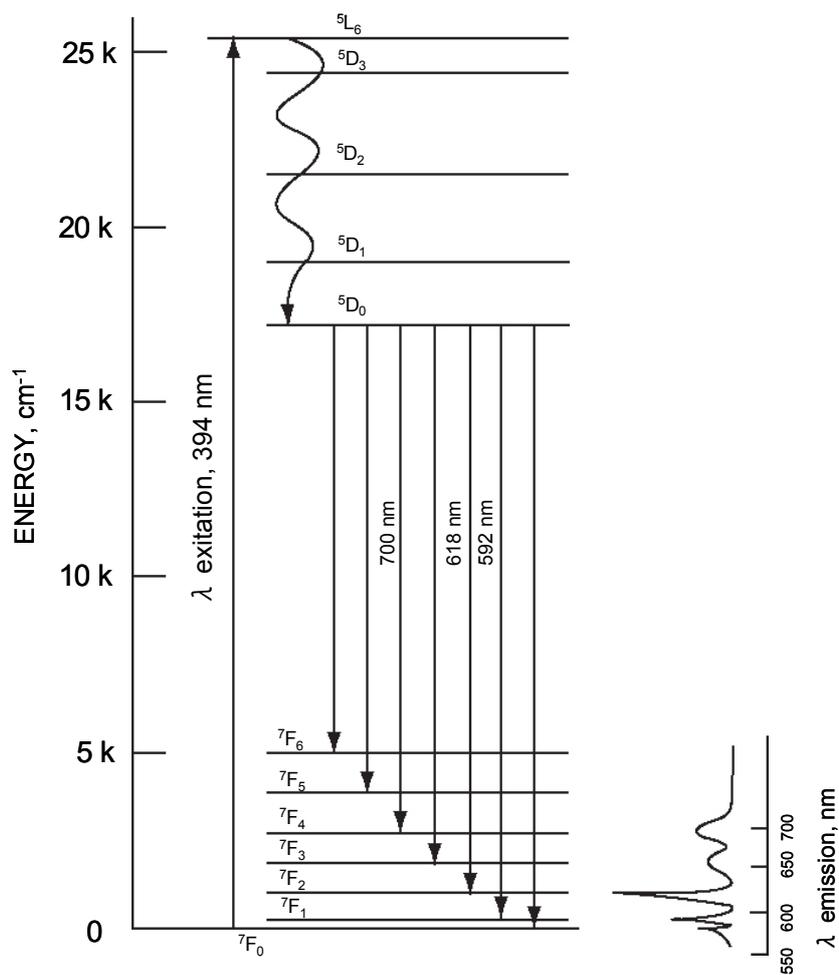


図 11 液相中の Eu(III)のエネルギー準位と蛍光発光スペクトル[8-10]

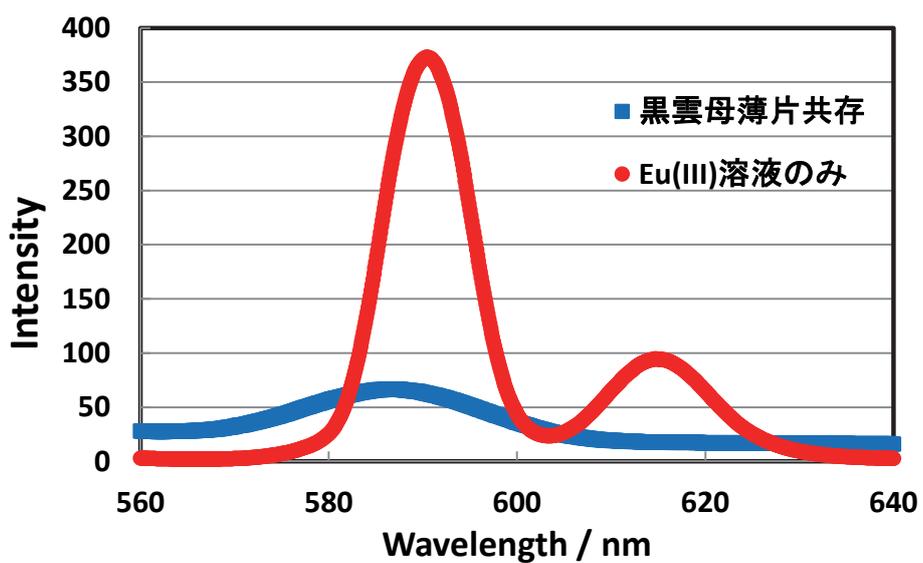


図 12 黒雲母薄片共存, および Eu(III)溶液のみの試料溶液の蛍光発光スペクトル

いことから、黒雲母薄片の共存、および黒雲母薄片への収着により、Eu(III)の化学形態に何らかの変化が生じている可能性が示唆された。そこで、ピークが確認できる 592 nm の蛍光発光スペクトルの減衰挙動も併せて調べることにした。

Eu(III)の蛍光発光スペクトルの減衰挙動

図 13 は、Eu(III)の蛍光発光スペクトルの 592 nm における減衰挙動である。Eu(III)濃度等の諸条件は図 12 の試料と同様である。図 13 からわかるように、Eu(III)溶液のみの場合は蛍光強度が直線的に減衰するのに対し、黒雲母薄片共存では 1000 μ s 程度まで曲線を描いて減衰した後、Eu(III)溶液のみの場合と同様に直線的に減衰した。そして、蛍光強度の減衰は黒雲母薄片共存下においてより速やかに進むことが確認された。

続いて、図 13 に示した減衰挙動から蛍光寿命を算出した。一般的に蛍光寿命は、蛍光の減衰がある指数関数に従う場合に蛍光強度が e^{-1} 倍に減衰する時間として定義される。しかし、図 13 の黒雲母薄片共存の蛍光発光スペクトルのように、蛍光強度の減衰が指数関数に従わない場合は厳密に蛍光寿命を定義することはできない[12]。そこで本研究では、Pointeau ら[13]の手法に従って、初期強度から e^{-1} 倍に減衰する時間(1st e-folding time)、 e^{-1} 倍から e^{-2} 倍に減衰する時間(2nd e-folding time)、 e^{-2} 倍から e^{-3} 倍に減衰する時間(3rd e-folding time)のように定義し、各々の範囲で蛍光寿命を算出することとした。なお、蛍光強度の減衰初期では散乱光の影響を受けやすいため、本研究では 2nd e-folding time と 3rd e-folding time について蛍光寿命を評価し、各々の評価範囲について図 13 に示した。表 1 に、算出した蛍光寿命をまとめた。Eu(III) 溶液のみの蛍光寿命をみると、2nd e-folding

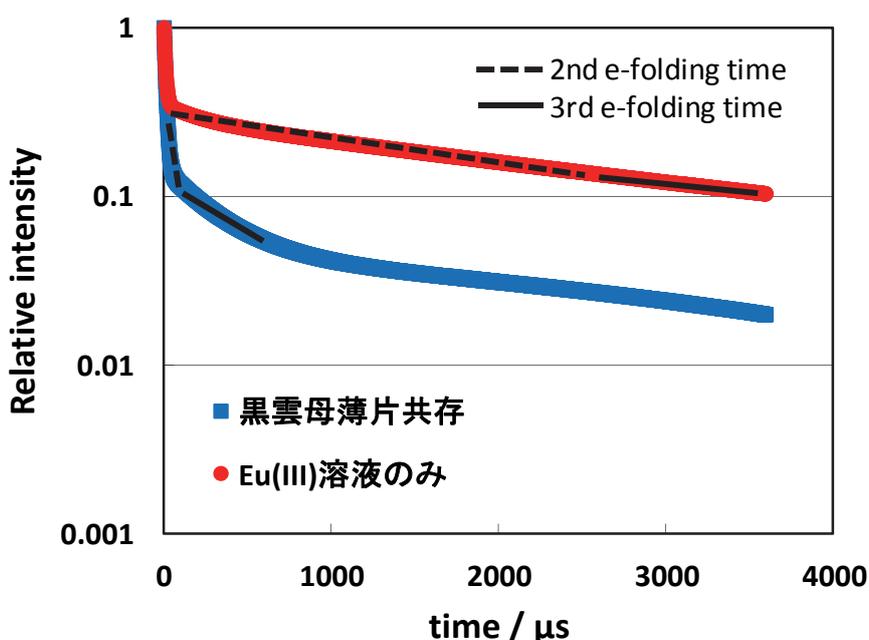


図 13 蛍光発光スペクトルの減衰挙動(592 nm)

表 1 蛍光寿命

(単位: ms)		
	2nd e-folding time	3rd e-folding time
黒雲母薄片共存	0.0431	0.7143
Eu(III)溶液のみ	3.333	3.333

time および 3rd e-folding time とともに同じ値が得られており、Eu³⁺の化学形態一種のみで存在することが確認された。一方、黒雲母薄片共存の蛍光寿命を Eu(III)溶液のみの場合と比較すると、黒雲母薄片共存では蛍光寿命が非常に短く、Eu(III)溶液のみの場合の 100 分の 1 程度となった。これは、黒雲母薄片に Eu(III)が蛍光発光に必要なエネルギーを奪われていること、すなわち Eu(III)が黒雲母薄片と密接に相互作用し固定化されていることを示唆する。このことは、Eu(III)が断口部から層間内部へより入り込んでいることを併せて意味する可能性がある。また、黒雲母薄片共存の場合では、2nd e-folding time と比べて 3rd e-folding time で蛍光寿命が長くなった。これは、黒雲母薄片に収着した Eu(III)と、液相に溶存する Eu³⁺が混在することによるものと考えられる。

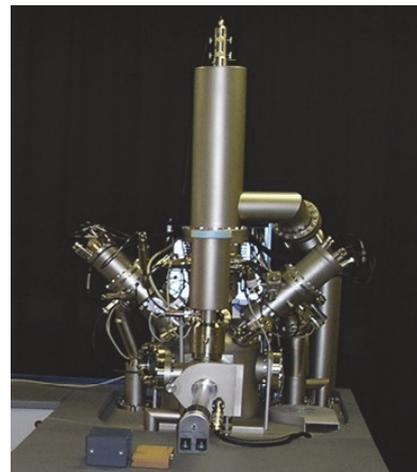
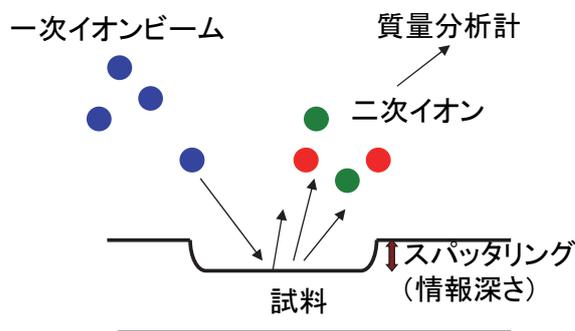
以上の予備検討から、黒雲母薄片への Eu(III)の収着挙動について蛍光発光分析により有益な知見を取得する見通しを得た。次年度以降、今回の予備検討に基づいた蛍光発光スペクトル取得や蛍光寿命評価を行い、収着挙動の検討を進める。

2.2.3 SIMS 分析の予備検討

本研究では、SIMS により黒雲母薄片内部への Eu(III)拡散を直接的に分析する。本年度は、SIMS 分析の概要をまとめるとともに、予備検討を行った。

SIMS 分析の概要

SIMS は、図 14 に示すように、個体試料表面に数百 eV~20 keV 程度に加速した一次イオンビームを照射することでイオンと固体との相互作用により二次イオンを放出させ、これを質量分析することにより試料に含有する元素組成や化学構造を分析する手法である [14]。一次イオンには、質量数が大きくクラスターの発生量が多い Bi が用いられる。SIMS の測定法は、一次イオンのドーズ量により、ダイナミック SIMS(1×10¹⁶ ions/cm² 以上)とスタティック SIMS(1×10¹² ions/cm² 以下)に分類される。前者は一次イオンを連続ビームとするためドーズ量が大きく、短時間に多くの原子をスパッタリングすることができるため、微量元素の高感度分析や深さ方向分析に用いられる。それに対しスタティック SIMS では、一次イオンをパルス化してドーズ量を対象表面の原子密度よりも非常に小さくすることで、



(東北大学多元物質科学研究所)

図 14 SIMS の分析概要と装置外観

分子内結合よりも分子間結合が優先的に切断され分子状態での二次イオン化が可能になるため、元素組成のみならず化学構造の情報も得ることができる。

本研究では、SIMS により黒雲母薄片内部の Eu(III)分布情報の取得を目指す。一次イオンのみでは表面から数 nm 以下の情報しか得られないことが判明したため、スパッターイオン(O₂)を併用したデュアルビーム分析を行うこととした。これにより、ビーム照射面からの深さ方向の Eu(III)分布を取得できるようになったが、スパッターイオンを併用した場合の分析は破壊分析に相当するため(前述のダイナミック SIMS に相当)、化学的な構造に関する情報は取得できなかった。また、SIMS 分析では、データ取得に先立って分析対象とする元素が質量干渉を起こすかどうか確認する必要がある。Eu(III)を含む黒雲母薄片試料では、Eu 化学種のスペクトル付近にピーク分離できない他元素由来のスペクトルが僅かに出現することが確認されたが、相対的に強度が非常に小さいものであったため、Eu(III)分布取得には支障が無いものと判断した。

SIMS 分析による Eu(III)分布取得

図 15 は、黒雲母薄片の Edge 1(図 7 参照)における SIMS 分析結果である。横軸がスパッタリングをかける時間、縦軸は検出器から出力された強度である。分析時に指定した元素のプロファイルが一括して図 15 のように得られる。本研究では Eu(III)の黒雲母内部への拡散、および K とのイオン交換に着目するため、これらの元素について Si で規格化したものが図 16 である。スパッタリング時に生成する二次イオン量は常に一定とは限らず、測定対象の表面状態にも大きく依存するため、黒雲母内に均一に含有する Si で規格化することにより、スパッタリングに起因した強度の揺らぎを補正した。また、図 16 の横軸をスパッタ深さ(μm)に置き換えた。これは、SIMS 分析後の黒雲母試料のスパッタリング箇所を原子間力顕微鏡で観察したところ、10000 スパッタ時間(s)で約 1.8 μm の深さであったこと

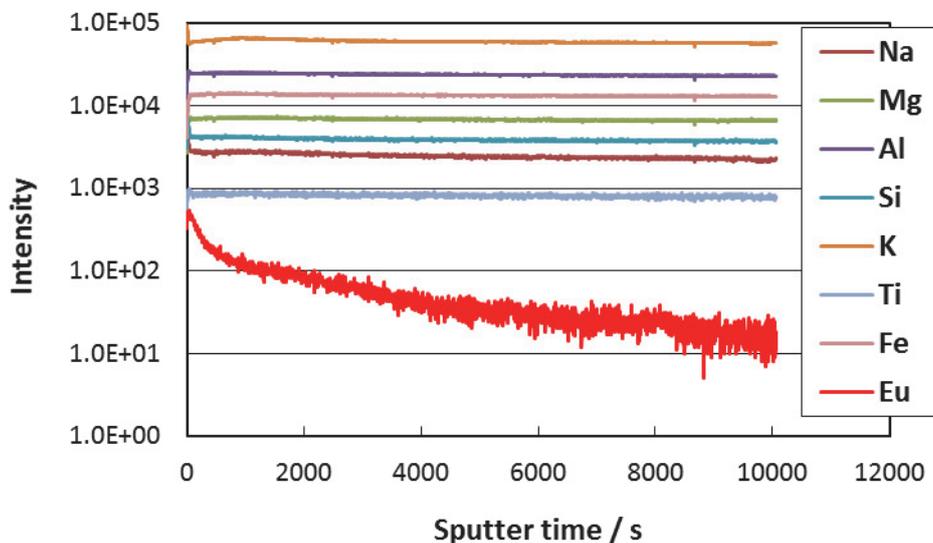


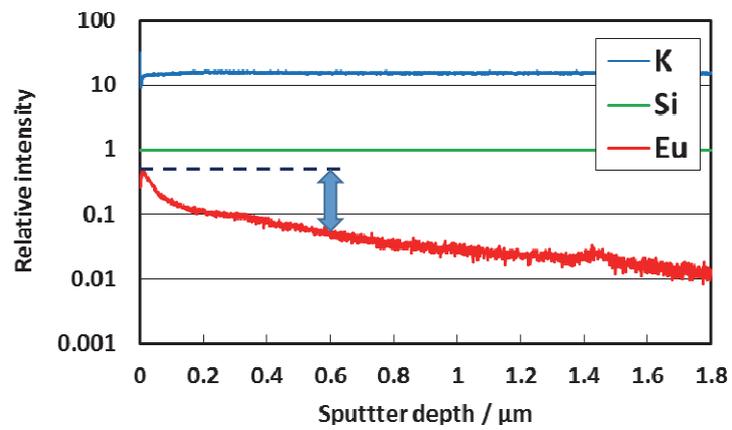
図 15 SIMS 分析より得られた元素分布(Edge 1)

から、スパッタ時間を深さに換算したものである。

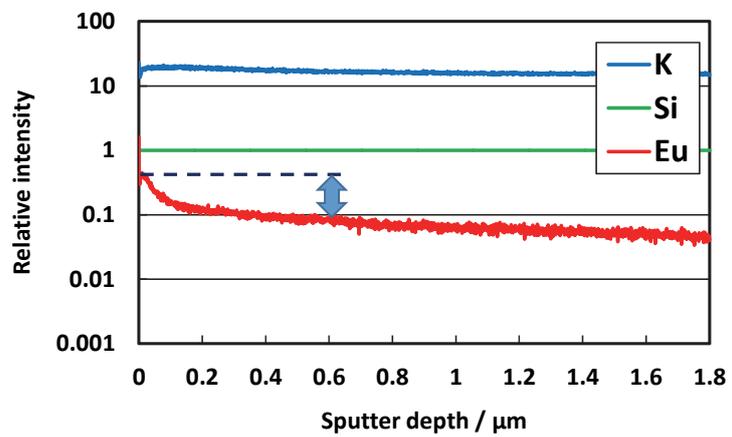
図 16 の Eu(III)分布プロファイルの比較から、黒雲母薄片の劈開部に相当する Center よりも、断口部にあたる Edge 1 および 2 で Eu(III)量が多く分布することが確認できる。また、図 16 中のスパッタ深さ 0.6 μm に付した矢印部の比較からもわかるように、Center よりも、Edge 1 および 2 では深さ 0 μm との強度差が小さく、黒雲母内部へ Eu(III)が侵入していることが確認された。一方、K の量はスパッタ深さの依存性は見られないものの、各測定点における relative intensity には違いが生じており、Center と比べて Edge 1 および 2 で減少していることが確認された。これは、2.2.1 で言及した Eu(III)の収着に伴って K がイオン交換により液相へ放出する現象とも整合する。

今回の予備検討では、Eu(III)の収着期間として 1 日しか確保することができなかったが、黒雲母薄片の劈開部や断口部における Eu(III)の収着量の違いや薄片内部への Eu(III)の拡散を示唆する結果が得られた。ただし、固相層間内部への拡散および収着は比較的緩やかに進行することが予想され、経時変化を確認できるよう今後の試験計画で考慮する。

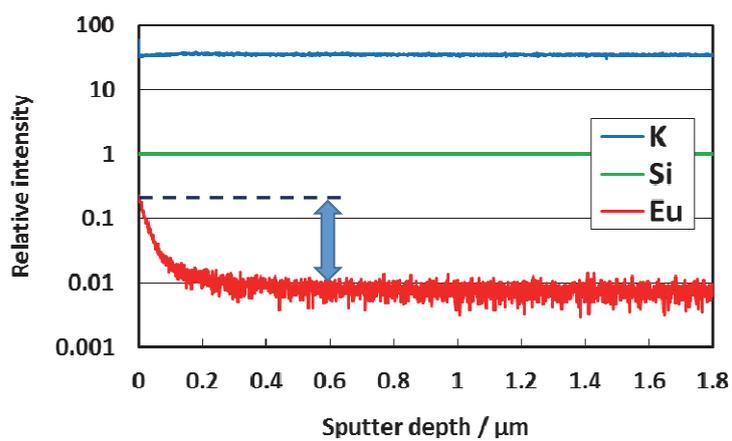
以上の予備検討から、黒雲母薄片内部への Eu(III)の拡散侵入について、SIMS 分析による元素分布プロファイルから有益な知見を取得する見通しを得た。次年度以降、今回の予備検討に基づいた黒雲母内部の Eu(III)分布分析を行い、収着挙動の検討を進める。



(a) Edge 1



(b) Edge 2



(c) Center

図 16 収着試験後の黒雲母薄片内部の Eu(III)分布

3. 平成 26 年度のまとめと次年度の予定

平成 26 年度は、鉍物試料を用いた Eu(III)の収着試験に着手した。黒雲母薄片を用いた Eu(III)の収着試験では、固相表面に Eu(III)が収着した後に、K とのイオン交換を伴いながら層間内部へ収着および拡散が進行するものと考えられる。既往研究では粉碎した黒雲母試料に多量に存在する断口部への速やかな核種収着が観察されたのみであるのに対し、実環境に近い形状である薄片状試料対しては収着と拡散という二つの過程が存在すると考えられ、花崗岩表面に断口部が露出する確率が高い黒雲母には更なる核種遅延効果が期待できる可能性が示唆された。蛍光分光分析および SIMS 分析の測定条件検討は実施計画の予定通り進められ、次年度以降のデータ取得に臨む準備が整えることができた。

平成 27 年度は、平成 26 年度に確認された収着試験系により、適切な経時変化取得を考慮しながら Eu(III)の収着試験を継続する。前年度に開始した低 pH 領域の収着挙動に加え、当該年度では実際の処分環境における地下水 pH を想定した中性領域(pH 8 程度)における Eu(III)の収着挙動について調べる。Eu(III)は pH 6 以上では加水分解するためにコロイド状態の Eu(OH)₃を形成することが知られており(Am も同様)、この場合の黒雲母への収着および層間内部への侵入を前年と同様に液相分析および蛍光分光分析や SIMS 分析によって検討する。また、黒雲母薄片内の核種拡散・収着について一次元の数学モデルで解析を行い、二次元数学モデルへの足がかりとする。

引用文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—分冊 3 地層処分システムの安全評価，(1999).
- [2] 式又裕文，新堀雄一，三村均：マイクロモックアップ法による遅延効果の空間分布の評価手法の検討，日本原子力学会東北支部第 31 回研究交流会講演要旨集，9-10 (2007).
- [3] 朽山修，高須亜紀，池田孝夫，木村英雄，佐藤正知，長崎晋也，中山真一，新堀雄一，古屋廣高，三頭聰明，山口徹治：核種移行モデルにおける収着分配係数の概念とその適用性，原子力バックエンド研究，5(1)，3-19 (1998).
- [4] 原子力安全研究協会：岩石と核種の相互作用に関する調査研究(III)，PNC-TJ 114 84-01 (1984).
- [5] 吉田英一，西本昌司，長秋雄，山本鋼志，勝田長貴：地下花崗岩体の変質とその形態—産総研岡山応力測定用深部花崗岩コア試料の変質を例に—，応用地質，49(5)，256-265 (2008).
- [6] S. Nishimoto, H. Yoshida: hydrothermal alteration of deep fractured granite: Effects of dissolution and precipitation, *Lithos*, 115, 153-162 (2010).

- [7] S. Nishimoto, H. Yoshida, Y. Asahara, T. Tsuruta, M. Ishibashi, N. Katsuta: Episyenite formation in the Toki granite, central Japan, *Contrib Mineral Petrol*, 1-12 (2014).
- [8] W. D. Horrocks Jr. and D. R. Sudnick: Lanthanide Ion Probes of Structure in Biology. Laser-Induced Luminescence Decay Constants Provide a Direct Measure of the Number of Metal-Coordinated Water Molecules, *J. Amer. Chem. Soc.*, **101**, 334-340 (1979).
- [9] Y. Haas and G. Stein: Pathways of Radiative and Radiationless Transitions in Europium(III) Solutions: Role of Solvents and Anions, *J. Phys. Chem.*, **75**, 3668-3677 (1971).
- [10] G. Stein and E. Würzberg: Energy gap law in the solvent isotope effect on radiationless transitions of rare earth ions, *J. Chem. Phys.*, **62**, 208-213 (1975).
- [11] Y. Niibori, M. Narita, A. Kirishima, T. Chida and H. Mimura: Fluorescence emission behavior of Eu(III) sorbed on calcium silicate hydrates as a secondary mineral formed without drying process, *Mechanical Engineering Journal*, **1**(4), 1-7 (2014).
- [12] 保田和雄, 大幡利一, 田村善蔵編: *けい光分析*, 講談社 (1982).
- [13] I. Pointeau, B. Piriou, M. Fedoroff, M. G. Barhes, N. Marimier and F. Fromage: Sorption Mechanisms of Eu³⁺ on CSH Phases of Hydrated Cements, *J. Colloid Interface Sci.*, **236**, 252-259 (2001).
- [14] 南條光章: *分析化学実技シリーズ応用分析編1 巻 表面分析*, 共立出版 (2011).

研究報告 6

高レベル放射性廃棄物処分に関わる アジェンダ・セッティング（政策課題設定）の 基礎的研究

東京大学 大学院工学系研究科

小松崎 俊作

I. 研究題目

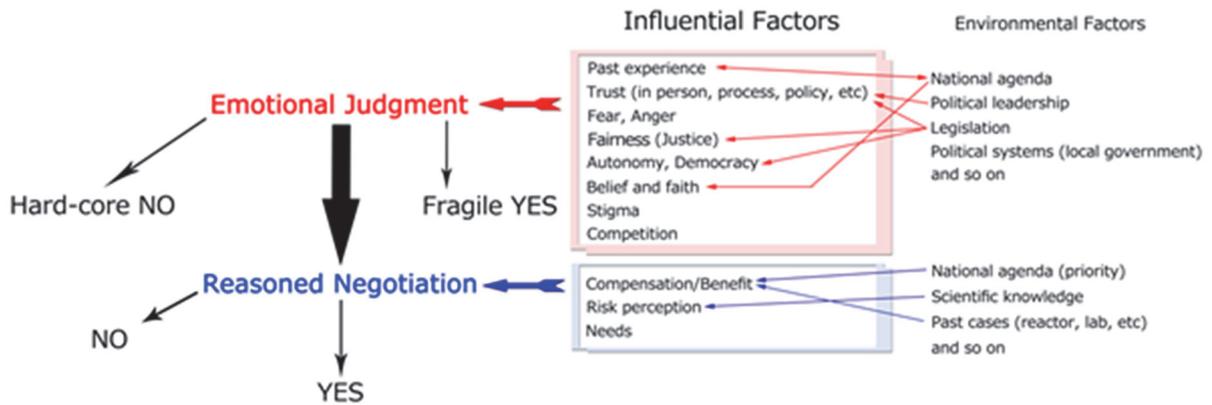
高レベル放射性廃棄物処分に関わるアジェンダ・セッティング（政策課題設定）の基礎的研究

II. 研究の背景・目的

東日本大震災および福島第一原子力発電所事故は、それまで気候変動対策やエネルギー安全保障などの観点から世界各国で推進の気運が高まっていた原子力発電政策を大きく転換するきっかけとなり、各国で改めて脱原発を含めたエネルギー政策論争が巻き起こっている。一方で、原子力発電の継続の如何に関わらず、少なくとも過去の発電等で生じた放射性廃棄物について処分政策を検討する必要があるのはどの国も同じであり、また我が国においては事故・除染由来の廃棄物なども新たに発生し、放射性廃棄物の処分はより重要性を増した政策課題となった。しかし、事故によって高まった放射性廃棄物処分に対する社会的認知にも関わらず、最も重要な高レベル放射性廃棄物の最終処分施設立地についての政策的議論は、これまでのところ実質的にはほぼ進展がなかった。これは、たとえば1990～1991年のフランスで、全国的な反対運動を受けて首相が処分地選定事業を中止し、1年間のモラトリアムの間にクリスチャン・バタイユ国会議員による総合調査を行って、抜本的な政策改善を図った例や、韓国において2003～2004年に全羅北道扶安郡で起こった処分施設立地に関わる紛争を踏まえて、イ・ヘチャン国務総理大臣らの主導で大幅な政策転換を図った例とは対照的である。

筆者らはこれまでに日本・スイス・フランス・韓国における放射性廃棄物処分施設立地に関わる紛争事例を調査・研究し（Komatsuzaki, 2013; 山口ら, 2011; Komatsuzaki, et al., 2010; 西郷ら, 2010 など）、その結果、下図1に示すようなステークホルダーの態度形成モデルを構築するに至った。高レベル放射性廃棄物処分を実現するためには、まず福島第一原子力発電所事故で大きく損なわれた専門家や政府に対する信頼を回復し、人々が納得する政策を提示する必要がある（社会的意思決定を行う「素地」が醸成される必要がある）。そのためには、社会全体が処分を「今意思決定・実施すべき政策である」という意識を共有すること、すなわちアジェンダ・セッティング（政策課題設定）が不可欠である。ただし、アジェンダ・セッティングのあり方は国の制度・文化等のコンテキストを踏まえて検討するべきである。

そこで、本研究では、処分事業に対する国民・社会の理解促進と信頼性向上をはかる上での前提条件となるアジェンダ・セッティングについての研究を通じて、社会的意思決定に関わる研究の効率的な進展に貢献し、処分事業の社会的側面に関する理解を深めることを最終目標とする。そのために、本研究は（1）高レベル放射性廃棄物処分のためのアジェンダが設定されるための要因を抽出し、（2）我が国における高レベル放射性廃棄物処分のために有効なアジェンダ・セッティングのあり方を提示することを目的とする。



(図 1：放射性廃棄物処分施設/政策受け入れに関わるステークホルダーの態度形成モデル)

平成 26 年度は、既存の様々な分野におけるアジェンダ・セッティング成功事例について政治過程分析を行い、アジェンダ・セッティングが起こる要因を抽出し、アジェンダ・セッティングの類型化を試みた。そのために、既往研究のレビューや専門家らへの聞き取り調査、アジェンダ・セッティングの類型化に関する仮説構築のための予備的社会調査を実施した。平成 27 年度以降の原子力分野におけるアジェンダ・セッティング事例分析のため、特に有益と考えられる事例（ドイツ・イギリス）について、予備的現地調査を実施した。このために、特にドイツの原子力政策に関する政治過程に詳しい国内専門家などに対するインタビュー調査も実施した。

また、筆者らが平成 22～24 年度に実施したアンケート調査（先述）のデータについて社会心理学的分析を行い、震災ならびに福島第一原子力発電所事故が高レベル放射性廃棄物処分政策や原子力政策に対するステークホルダーの態度に与えた影響を分析した。一方で、可能な範囲で以前の調査におけるパネルデータを維持しつつ、人々の態度形成やアジェンダ・セッティングに関わる Web アンケート調査を実施した。

III. 研究成果

1. アジェンダ・セッティングの事例分析と類型化

1.1.はじめに

今日のわが国は、エネルギー・ミックスの検討、社会福祉費の増大、財政赤字の拡大等の政策転換を必要とする問題が解決されないままである。高レベル放射性廃棄物（HLW）処分に関わる議論はこの一例である。2011 年の東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故の影響により、日本における原子力発電所の一切が停止中である（2015 年 2 月）。しかしながら、以前の発電によって生成された放射性廃棄物については、依然として処理する必要がある。2002 年から原子力発電環境整備機構（NUMO）は処分地を公募しているが、調査に至った自治体はない。

現在の公募方式のもとで HLW 処分場の誘致が進まないことは、応募すると交付金が下りるといった構図によって生み出される、感情的な対立が原因である（西郷 2009）。HLW が核でありゴミであることや、想定される時間が非常に長いことが反感を招く要因となっている。さらに、HLW 処分場は反原子力運動のメインターゲットにされている。わが国には原子力発電そのものに反対

し、発電を止めるために活動している団体・個人が一定存在する。その活動にとってのメインターゲットが HLW 処分場である。それは、HLW 処分場が立地することによって、原子力発電の一連のプロセスが完成してしまうからである。原子力発電は今まで廃棄物の処理法がないまま稼働して「トイレなきマンション」と批判されてきたが、この状態であるからこそ、「原子力発電を止める」という主張の説得力が増すのである。そのため、活動家は立地検討地域に積極的に入り、住民に対して「HLW に対する反感」の材料を提供してなるべく激しい反対運動が起こるよう促すのである。つまり、HLW 処分場を誘致することによって利益を得る自治体や NUMO と、害を被る市民や反原子力団体との対立によって、この問題は解決されていない。

また、企業規模間格差も解決されていない問題である。中小企業問題は中小企業の自助努力のみでは克服・解決しがたい問題であるため、中小企業政策が必要となる。しかしながら、付加価値生産性格差や従業員 1 人当たり賃金格差等の経営諸指標によると、企業規模間格差は 2000 年代に入り拡大傾向にある。もちろん、このような格差は市場競争の結果として生じたものであるが、格差拡大は不公正取引の誘引の可能性も持っている（高田 2003）。そのため企業規模間格差は是正の検討をするべき問題である。

中小企業問題が解決されないのは、企業規模間格差が存在しているという認識が不足しているからである。1999 年の中小企業政策審議会答申にて「中小企業従事者についても、実質的な所得水準、生活水準の向上をもたらしてきた」と指摘して、同年以降の中小企業政策は格差の是正ではなく創業の促進に重きを置かれるようになる（植田 2004）。しかしながら、格差が是正されているとの認識は所得水準のみに着目したものであり、その是正も十分ではない上に、付加価値生産性や特別給与、企業内福祉、退職金、教育訓練費等の指標を見ると格差は拡大している（高田 2010）。つまり、企業規模間格差の問題は、依然としてあるものの問題であると認識されていないことから解決されていない。

以上の 2 つの問題が解決されない要因は、両者とも問題の認識が関係している。前者については、利害対立関係にあるアクター間で共通の問題認識を築けていないことから政策転換が行われず解決されない要因であり、後者については、潜在的な問題についてそれが問題であること自体が認識されていないことから政策転換が行われず解決されない要因である。これらのようにわが国の社会問題は、解決に向けて取り組むべき課題であると関係するアクターの間において共通に認識されないから、解決されないものがあると考えられる。

このような問題を政策転換によって解決するためには、アジェンダ・セッティングが必要である。アジェンダ・セッティングとは、政策過程の始点に位置づけられるステージであり、問題と代替的解決法が一般大衆やエリートの注目を得る、または失う過程のことである（Birkland 2007）。先の問題の要因は関係するアクターの間において社会問題が解決に向けて取り組むべき課題であると認識されないことであり、つまりはアジェンダがセットされていないということである。アジェンダ・セッティングは政策過程の始点に位置づけられるステージであり、アジェンダがセットされない限り政策過程は起動しない。そのため、アジェンダ・セッティングは問題を解決するにあたり不可欠である。

政策過程分析では図 1-1 に示されるような、アジェンダ・セッティングにはじまり、政策形成、

政策決定、政策実施、政策評価、そしてフィードバックへ続くステージモデルを念頭におくことがある（小倉 2012）。実際には、政策過程はそのような順序について、その順番通りに進むわけではないかもしれないが、このモデルは現実の過程を理解するためには十分に有用であろう。アジェンダ・セッティングはこのような政策過程の諸段階のうち、始点に位置づけられている。

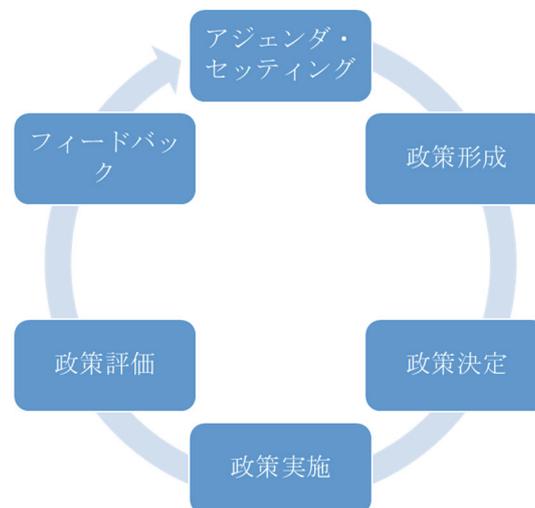


図 2：政策サイクル

アジェンダとは

先行研究を概観した Birkland (2007) によれば、アジェンダとは「問題群、原因の理解、シンボル、解決法、およびその他の、一般大衆や政府当局者の注目を得ようになる公共的問題の諸要素」と定義されている。そしてアジェンダ・セッティングは、「問題と代替的解決法が一般大衆やエリート注目を得る、または失う過程」と理解されている。

また、アジェンダに対する取り組み方の違いから「システムミックアジェンダ」と「制度的アジェンダ」の2つに分けられる。前者は「政治コミュニティのメンバーによって、公的注目に値すると、また既存の政府当局の正当な管轄内に収まる問題を伴うと共通して認識されているあらゆるイシューから構成される」(Cobb and Elder 1971)。一方で、後者は「明示的にアクティブかつ真剣な権威的決定作成者の考察の候補となっているアイテム集合」とされる。また、後者については「政府行動を必要とする問題があることをリーダーが知っていて、たとえ問題の公式の認知に過ぎなくとも、なんらかのタイプの反応を行う」ことが求められている。つまり、システムミックアジェンダはある状況について問題であると認識されたもので、制度的アジェンダはある状況についての問題について検討されているものである。

本研究の究極的な目的は、社会問題を解決するためにアジェンダ・セッティングの方法論を確立すること、である。すなわち、ある状況について、その問題がどのように制度的アジェンダになったのかが問題になる。イシューが制度的アジェンダになるのは、それに対する政治的対応が必要であることを権威的な決定作成者が認識したときである。制度的アジェンダは「地方、州、あるいは国レベルのあらゆる政府機関の前にあるすべてのアイテム集合」(Cobb and Elder 1971)から構成されると考えられている。政治リーダーや政党、メディアが主として「制度的門番」として挙げられるが、この点について、より明確にするため「権威的アクター」を制度的観点か

から見直す必要がある。

「所与のイシューについて権威的な決定がなされる制度的な場所」(Baumgartner and Jones 2009)は「政策の場」と呼ばれている。ここでいう制度とは憲法に規定されるようなフォーマルなルールから歴史的に形成された慣習のようなインフォーマルなルールまで幅広く指している。一方で、権威的とは、当該アクターによる判断や選択が無視されないことが、制度的に担保されているような状態を指している (Timmermans 2001)。

政策の場は国、地方、あるいは国際的なレベルにわたって複数存在するだろう。また、国レベルにおいても、政策の場は複数存在しうる。たとえば、たばこの問題は、農業関係、健康関係、財政関係の複数の領域において取り扱われるかもしれないし、そうした領域は立法部門にも行政部門にも存在しうる。そして、たばこの問題を、農業関係の場が農家の生活、健康関係の場が喫煙の健康への影響、財政関係の場が税収の観点から関心を向けているように、異なる政策の場においては、関心の対象、あるいは政策イメージは異なって存在している。従って、ある場では通用しない主張が別の場では受け入れられるということもありうる。

政策の場は、慣習を含めたフォーマル、インフォーマルな制度によって規定されるため、その政策過程上の位置や数は政治システムによって異なる。例えば、わが国の国レベルの場合について、中島 (2007)、早川・内海・田丸・大山 (2004) を参考に一般論的に考えてみたい。まず、内閣提出法案の立法過程は始点を省庁においている。法案作成を担当するのは官僚である。そのきっかけとなりうるのは、様々な指標の変化、注目を集める出来事の発生、与党や政府内部の政治家からの支持や要求、産業界等の利益集団からの情報や働きかけ、判決などである。その後、審議会における検討、省庁内部での調整を経て、原案が作成され、続いて与党および他省庁との調整、内閣法制局による審査にかけられることになる。これらを経た上で法案は閣議決定され、国会へと提出される。そして、提出法案は両院での可決を通して法律となる。

誰が制度的アジェンダの設定を行う権威的なアクターあるいは場であるかという問いを、誰が立法の契機を与え、政府の課題リストに加える事ができるのかと言い換えると、それは官僚と与党および政府内部の政治家となる。それには劣るものの、利益集団や審議会などは、それらのアクターへの働きかけによってアジェンダ・セッティングに関与することができる。

以上の検討から、本研究では、制度的アジェンダの設定の定義にある「権威的アクター」として、官僚や与党および政府内部の政治家を想定している。ある問題について対応が必要であるとこれらのアクターが認識して取り上げれば、それは制度的アジェンダと見なされる。さらに、その後の過程では、官僚や審議会を中心に政策形成が進められ、拒否権を握る与党の事前審査が重要な障壁を構成している。Immergut (1992) が指摘するように、「政治的決定は単一時点にされる単一の決定ではない。むしろ、それらは異なる制度的位置にある異なるアクターによってなされる一連の決定から構成される。簡単にいえば、法制定にはすべての決定点での連続的な賛成票が必要になる」。この一連の過程を通過することが、政策決定にたどり着くためには必要である。

政策の窓モデル

先に説明したアジェンダがセットされる過程は Kingdon (1995) によって「政策の窓」モデルが提唱されている。Kingdon は政策過程に三つの流れがあるとしている。第一は「問題の流れ」、第

二は「政治の流れ」、第三は「政策の流れ」である。

第一の「問題の流れ」は、数多くの問題の中から、特定の問題が権威的アクターの関心をひきつけ、課題として設定される過程である。問題が現れる契機として指標、フォーカシング・イベントと呼ばれる出来事、そしてフィードバック等が挙げられている。例えば出生率や犯罪発生件数のような指標の悪化、危機や災害、事件や判決といった人々の耳目を集める出来事、そして既存の制度や政策運営からのフィードバックは、アクターに新たな問題を認識させることがある。現状の変化が取り組むべき問題を生じさせる。しかし、ある状況を問題と認識するか否かであったり、どのようにその状況を認識したりするかは、アクターによって異なるはずである。言い換えれば、「状況」と「問題」は異なるものを指している。

この違いは Kingdon によって以下のように説明される。「あるロビイストが述べたように『もしあなたの手で 4 本しか指がないならば、それは問題ではない。状況である』。条件は。我々がそれについて何かするべきであると信じるようになれば、問題として定義されるようになる」。そこで、それぞれのアクターが「観察に持ち込む価値観」が重要になっている。たとえば、社会内に経済格差が存在し、一定の人々が貧困であると分類されるということに一定の同意は存在している。しかし、貧困は政府によって対処され是正されるべきだと考えるリベラルはそれを問題として理解する一方で、貧困は政治行動を起こす適切な主題ではないと信じる保守派は社会内の所得分布を単なる状況だと考えるだろう。つまり、単に「現実」が変化したことで問題が浮上するという場合でも、アクターが持つ認識が大きく関係している。

第二の「政治の流れ」は、議会における与党の交代等といった政治的な出来事が課題設定に影響を与える過程である。議会の党派的イデオロギー的構成の変化、政権交代、行政内部の職員の入れ替わりといった出来事は、既存の制度や政策を支えるものとは異なるアイデアを有するアクターを政策の場へと連れてくることで、新しい問題を浮上させることがある。また、「政治の流れ」においては、専門家の間で見られるような説得というよりも、取引や交渉によって合意が形成される、と指摘されている。つまり、政治アクターの説得というよりも、何らかの利益交換が行われ得るということである。

第三の「政策の流れ」は、政策代替案が検討される過程である。様々な人々や組織から政策案は提案される。特に、官僚、シンクタンク、研究者といった人々によって問題が議論されている。彼らは政策専門家であり、問題が生じる前や課題が設定される以前に、政策提言を行っている。政策専門家から提案される多くのアイデアのうち生き残る主たる条件は三つある。一つ目は実現可能性である。二つ目は政策決定集団の意識との整合性である。三つ目は予算等の制約である。また、国民からの支持が影響することもある。

以上、三つの流れ、すなわち「問題の流れ」、「政治の流れ」、「政策の流れ」は独立の過程として展開するが、完全に独立しているわけではない。この流れの間には相互的作用もあり、三つの流れが合流するときに「政策の窓」が開く。問題が認識され、政治的風潮も変化の時期にあり、解決策がすでに準備されている時期が、政策提言の好機となる。つまり、「政策の窓」が開いたときにアジェンダ・セッティングがなされ、問題が解決に向けて取り組まれるようになる。

「政策の窓」を開くために必要な三つの流れであるが、それぞれ影響をあたえることができるアクターは異なっている。「問題の流れ」と「政治の流れ」については、首相や大臣、議会の高

名な議員，メディア等が一般の注目を集める．一方で「政策の流れ」は，先にも述べたように官僚やシンクタンク，研究者といった政策専門家の影響を強く受ける．

アジェンダ・セッティングの手法

アジェンダ・セッティング過程においてどの問題や政策案が優位となるかは，様々な要因により左右されうる．その中で，政治アクターが取りうる手法として一般的に論じられているのは，イシューの描き方やフレーミングによる説得や交渉を通じた利益交換である．フレーミングとは問題の捉え方や状況の定義の仕方，情報や知識を組織化する認識の仕方のことである．意思決定において選択肢の記述の仕方が選択に影響をおよぼすとされており，このことはフレーミング効果と呼ばれている（Tversky and Kerneman 1981）．

ある特定の社会問題が生じた際には，問題に関する情報を収集，ふるい分けし，問題に対する意味付けや評価を行い，自らのポジションを確認して行動が選択される．フレーミングは，どのような理由で問題が生じ，どのような行動が問題にとって重要であり，関係者がどのような要因で関与しているか，今後どのような対応をすべきかを理解するために重要である．権力を持つアクターは様々な捉え方ができる曖昧な状況を利用することによって，自らに適した課題フレーミングを行うことがある（佐藤 2002）

パラダイムシフト

アジェンダ・セッティングは政策転換の際に必要なものとなる．それは，既存の問題認識のなかでは解決できない問題にアプローチするためである．ここではHall（1993）を参考に政策転換を3つのパターンに区分したい．第一に，政策目標も政策技術も変わらないまま微調整が行われる場合，第二に政策目標は大きく変わらないが，新しい政策手段やアプローチが政策エキスパート主導の下で発展する場合，第三に政策目標そのもののパラダイムシフトが生じる場合である．第三のパターンでは，既存のパラダイムの内部で解決できない事例の増大に伴い，制度内部の権威関係が何らかの形で変化し，選挙など外部の政治的な圧力やメディアも深く関わる．このモデルでは，高次元の政策転換は低いレベルの政策転換を内包し，最終段階の秩序転換には政治的言説上の重大な変化が成功すると想定されている．

アジェンダ・セッティングは「政策の窓」モデルによって説明されうるが，アジェンダ・セッティングの手法は未だ包括的には提示されていない．依然としてフレーミングによって問題の捉え方や認識の方法に影響をおよぼす手法について論じられるのみである．その手法を使っているアクターとして想定されているのは，首相，大臣，高名な議員，メディア等の一部の政治アクターのみである．しかしながら，政策専門家もアジェンダ・セッティングによる政策転換を図ろうとしている．次章で詳説するが，医師不足は政策専門家によってアジェンダ・セッティングが行われた例である．このアジェンダ・セッティングは既存の手法によっては説明され得ない

そこで本研究はまず，アジェンダ・セッティングが行われた事例の全体像を把握することを目的としている．さらに上位の目的として，分類の各項目を検討することにより，政策立案者がアジェンダ・セッティングを行う支援に資する示唆を得ることを設定している．

1.2. アジェンダ・セッティングの事例分析

本章ではまず、アジェンダ・セッティングが行われた事例の全体像を把握するために、アジェンダ・セッティングが行われた事例を選定する。そのために、特定の政策領域に限らず日本国内外の事例を収集した。次に、それぞれの事例についてその政策過程を分析した。その際に必要となる情報は、書籍など各種文献を中心に、不足した情報についてはその政策領域の研究者や当事者にインタビューを行い収集した。収集した情報をもとに、政策の概要、背景、政策過程を再構成した。再構成した情報をもとに、分類を行うにあたって必要な政策過程の特徴を見出すために、主要な過程の可視化を行った。本研究における可視化は、政策転換が必要とされる背景と制作過程に影響を及ぼしたアクションについて因果関係を整理した形で示した。

対象としたアジェンダ・セッティングの事例は以下の10個である。

- ①医師不足
- ②郵政民営化
- ③ゆとり教育
- ④アベノミクスの第一の矢である異次元の金融緩和
- ⑤ドイツのシュレーダー政権下における脱原発の決定
- ⑥ドイツのメルケル政権下における脱原発の再決定
- ⑦入管法の1990年改正
- ⑧定住外国人との共生

選定した事例の政策過程について必要となる情報は、書籍など各種文献に収集した。また、不足した情報についてはその政策領域の研究者や当事者にインタビューを行い収集した。4つの事例について、合計6人にインタビュー調査を行った。一回あたりの時間は1時間から3時間であった。

収集した情報をもとに、政策の概要、背景、政策過程を再構成した。再構成した情報をもとに、分類を行うにあたって必要な政策過程の特徴を見出すため、主要な過程の可視化を行った。本研究における可視化は、政策転換が必要とされる背景と制作過程に影響を及ぼしたアクションについて因果関係を整理した形で示した。

医師不足

医師不足・偏在の概要

医師不足・偏在問題として挙げられる状況には大きく分けて以下の5つがある。

- ①国家レベルでの医師不足
- ②都道府県レベルでの医師偏在
- ③都道府県内の二次医療圏レベルでの医師偏在
- ④診療科別の医師不足・偏在
- ⑤夜間診療や救急医療における医師不足

以上のような医師不足に関する指摘は、2000年代後半から始まった。

1980年代以降、厚生労働省は医師数について医師過剰であるとの見解を示しており、2006年に至るまでは「医師不足はなく、偏在しているだけである」と見なしていた（厚生労働省医政局 2006）。この報告は1948年に定められた医師算定法の標準医師数にもとづいており、現状を適切に表現しているとは言いがたいものだった。しかし、地方において十分な医療が提供できなくなっており、2007年2月に日本医師会は、医師不足の原因は従来から主張してきた偏在だけでなく、絶対数の不足も認められるとして、以前からの見解を覆した（日本医師会 2007）。厚生労働省も2007年から、医師不足について絶対数の不足を報告している（『日本医事新報』 2007）。それに伴い、2008年6月には厚生労働省は「安心と希望の医療確保ビジョン」を発表した。子の中では、医学部定員削減が見直され、また、医師養成数を増やす取組が行われている。

医師不足・偏在の背景

このように、医師不足・偏在が問題として取り沙汰されるようになった背景について、医師数の絶対的不足と、医師の偏在とに分けて説明していきたい。

まず、医師の絶対数の不足についてであるが、厚生労働省の医師・歯科医師・薬剤師調査では、2012年12月31日における全国の届出「医師数」は303,268人と報告されている。1986年には、この数は191,346人であり、20年で医師数は約1.5倍に増加したことになる。医師数が増加しているが、経済協力開発機構諸国の人口あたり医師数の比較によれば、2006年の時点で、人口100,000人あたりの医師数は、日本はOECD加盟30カ国うち、26番目であった。同じ報告において、平均の医師数は310人とされ、わが国の医師数はOECD諸国の平均のおよそ2/3であった（杉野 2009）。

しかしながら、わが国では1982年の第二臨時行政調査会の後、長らく医師過剰が報告されていた。具体的には、「医療従事者について、将来の需給バランスを見通しつつ、適切な養成に努める。特に、医師については過剰を招かないよう合理的な医師養成計画を樹立する」と発案している（臨時行政調査会 1982）。

この臨時行政調査会からの報告により、政府は1982年9月に、医師の要請計画の再検討および医師抑制策を決めた（二木 2009）。しかし、1948年に定められた医師算定法の標準医師数にもとづいており、当時の現状を適切に表現しているとは言いがたいものだった。1980年代のわが国の1000人あたり医師数はOECD諸国の平均を下回っており、現在に至るまでその差は広がる一方である。

さらに、1984年から、医学部の定員人数は7%減少している。これは1970年代に、私立新設医学部の急増および各県一医大構想によって医学部の定員人数が増加し、医師過剰が危惧されたためである（小川 2008）。わが国では、医学部を卒業し医師国家試験に合格することによって医籍に登録され、医師として活動することができるようになる。その数が増えすぎた場合に、医師および病院間での過当競争が生まれることが想定されていた。

また、医師の絶対数の不足については、少ない医師数でも世界最高水準の医療を実現しており、しかも医師数が増え続けていることから、「医師数」の不足ではなく、医師数の増加割合を超えて医師の業務量・負担が急増しているとする見方もある（小松崎 2012）。このような医師に対する過剰な負担は、1ベッドあたりの職員数がきわめて他国に比べて低いことから、問題視されて

きた。さらに、1990年代以降病床数はほぼ横ばいであるのに対して、平均在院日数が急激に短縮されていることからベッドの回転数が増加し、医師の単位時間あたりの業務量が増加していると推定される。また、救急医療や夜間診療において、医師に対する需要が増加していることも、この「医師不足感」を招いていると考えられる。

このような医師不足に共通する要因として、急速な高齢化が考えられる。先に示したように、医師数は1986年以降、1.5倍になっており、人口1000人あたりの医療施設従事医師数は全体として増加傾向にある。しかしこの指標も65歳以上の人口で見ると減少傾向にあり、高齢化に対して医師の供給が追いついていない現状が指摘されている（森 2008）。救急医療における高齢患者の増加や、これまで急速に高齢化が進んだ非都市部での医師数減少など、高齢化が医師不足感に影響を与えていると考えられる。

次に医師の偏在について、まず、2004年4月から実施された新医師臨床研修制度の影響から説明する。この新制度は①全人的診療能力の修得、②研修に専念できる環境整備、③マッチングシステムの導入の3点からなっている。（厚生労働省 2002）特に、マッチングが引き金となり医局による医師の引き上げが発生したことは、日本医師会（2008）の調査から明らかである。また、同じ調査から派遣中止された施設のうち44.6%が診療制限を行い、16.5%は閉鎖に追い込まれていることが報告されている。これらのデータから、新制度の導入によって、医局からの派遣医師が引き上げられた結果、残された医師の負担が増加して、地方の総合病院において診療制限・閉鎖・医師不足が起こったと推定される。さらに、新制度導入により、医師不足が強く主張される産婦人科において派遣医師数の減少割合が最も大きくなっており、診療科別の偏在も招いていると推定される。

別の要因として、医療費抑制政策が挙げられる。この政策が診療報酬の抑制や医学部定員数削減に影響して、勤務医の過重労働や疲弊を促進したと推定されている。このことから、社会保障費圧縮政策によって病院の経営が悪化し、医師の流出が起こったと考えられている。さらに、2006年に「7対1看護配置基準」が導入されたことによって、全国的に看護師の需要が高まり、地方の中小病院では大きな打撃を受けている（小松崎 2012）。

また、医療機関の減少も、この問題を招いていると考えられている（池上 2009）。医療費の抑制傾向はほぼ20年間変わっておらず、他国と比べて近年急に格差が広がったわけではないが、特に産科や産婦人科について医療機関数が減少したことが、産科医の不足感につながっていると指摘している。

医師不足・偏在の因果関係分析

医師不足・偏在の問題は2000年代後半から指摘されるようになったが、この問題の原因が新医師臨床研修制度であると論じられることが多い。しかし、新制度が直接的に偏在を引き起こしているのは初期研修医であり、実働医師数に反映されるまでは5～10年かかるはずである。さらに、現在の実働医師はマッチングとは異なるメカニズムによって分布している。

むしろ、医師の絶対数の不足や社会保障費の圧縮政策、地方自治体の財政悪化といった要因か

郵政民営化

郵政民営化の概要

2005年10月11日に衆議院において、14日に参議院において郵政民営化法案が通過、成立した。この政策は、小泉政権が構造改革の本丸として掲げた郵便・簡易保険・郵便貯金の郵政三事業を民営化することを目的とした政策である。郵政事業を担っていた郵政公社を、民間企業に移行させることであり、まず、株式会社に衣替えを行いさらにその株式を次第に民間に売却していくことを決定した。

この決定は、諸外国に礼をみないほどの巨額の預金量を誇る郵便貯金と簡易保険を担っている郵政事業について、民営化を通じて財政投融资の見直しを行うためのものである。

郵政民営化の背景

大嶽（2006）によると、郵政民営化が初めて論じられたのは、1981年に発足した第二臨時行政調査会によってである。しかし、国民が認識しだしたのは1976年にヤマト運輸によって始められた宅急便の郵便小包と比べての便利さ、安価さが大きな要因であった。換言すれば、郵便貯金、簡易保険、郵便事業の3つの郵政事業の内、郵便事業の民間への開放が、世論の最も強い関心を集めたということである。この時期、一般の国民にとっては、農村や離島も含めて、全国的なネットワークを持ち、かつ比較的高利率で安定していた「郵貯」、「簡保」は、民間の金融機関よりも便利なものであり、改革を必要とするものとは映っていなかった。

一方で、政府や実業界にとっては、改革の必要は郵便事業ではなく、郵便貯金の方であった。一つは民間銀行に比べてあまりにも大きな預金量が金融機関を脅かしていたことである。93年秋に細川内閣時代の第三次行革審が、郵便貯金の肥大化に懸念を表明する答申を行っている。さらに、政策エリートのレベルにおいては、財政投融资の巨大な無駄の源泉となっている郵貯の使い道に懸念が生まれていた。これらの資金は、国債の購入に多くが使用されていたが、90年台の「金余り」の状況の中で、さして必要もない、あるいはまったくむだな公共投資に振り向けられていたのである。それは特殊法人、公益法人等を介してであった。

さらに、1990年代、金融問題が重要な争点として浮上してくると、民営化された郵貯は、自由な金融市場に参入し金融自由化の「総仕上げ」にもつながると主張されるようになった（小泉1996）。また他方で、調達面での優位性を失い、運用面でも苦戦を強いられることが予想された郵貯・簡保事業にとって、350兆円にのぼる資産規模を維持し続けることが経営の足かせとなるとの見方もあった（田中2006）。

だが、世論調査によれば、2005年9月の総選挙の時期を除くと、郵政改革を最も必要な課題とするものは、多くて国民の数%以下に過ぎなかった（池田2007）。また、2005年1月小泉内閣が通常国会に向けて改めて郵政民営化を最大の争点として再浮上させた時期に行われたインターネットによる政府の意識調査によれば、10の政策課題のうち郵政民営化は第8位を占めたに過ぎない。また、郵政民営化の賛否については「賛成」、「どちらかと言えば賛成」が計55.1%に達しているが、便利な郵便局をなぜ廃止しなければならないのか国民の約半数は納得できないでいたのである。

また政治的な背景として、官邸主導の政策決定過程が導入されたことを説明したい。

郵政民営化には、官邸主導というそれまでの政府・与党の政策決定過程とは全く異なるプロセスが導入された。この官邸主導の実態は、首相が議長を務める経済財政諮問会議が制度的中心をなしたことと、自民党の政務調査会、総務会による行われる事前審査という慣行を無視する小泉の強引な手法によるものであった（大嶽 2006）。

2001年に小泉内閣が成立すると、小泉は諮問会議を率いる経済財政政策担当相にエコノミスト、竹中平蔵を選んだ。そして、初の閣議において小泉は竹中の助けを得て自らが経済運営の主導権を握る決意を表明する。官邸主導のトップダウン方式の経済運営を宣言したのである。そして、小泉は週一回の諮問会議を最重要会議として位置づけ毎回出席することによって、内外にこの会議をいかに重視しているかを示し、諮問会議に経済政策の「司令塔」として強力な権限を与えた（読売新聞政治部 2005）。

また、小泉は人選において常に、与党への根回しもなく彼一人による全くのトップダウンによる決断を行っている。道路四公団に関する第三者機関の人選や郵政公社の総裁の人選において首相主導を貫いている。この組閣を初めとして人事に他人からを出させないという方針を貫くことによって、小泉に忠誠を尽くす姿勢を示さなければ、他にどんな有力な人脈があろうと、期待するポストにつけないというメッセージを発信し、小泉への求心力を確保していた。このことが、ときに事前審査性という慣行を無視することができるような強力なリーダーシップにつながったのだ（大嶽 2006）。

郵政民営化の政策過程

本節は大嶽（2006）を参考に郵政民営化の政策過程を再構成したものである。

小泉政権発足後、「郵政三事業のあり方について考える懇談会」という首相の私的懇談会が設置された。しかし、自民党総裁選挙で最大の争点として郵政民営化については、この時期は、この私的懇談会が作られたくらいで、その他の準備はされなかった。2002年8月にこの懇談会の最終報告が出されたものの、改革案は一本化されず、特殊会社案、郵貯と簡保の民営化案、廃止案の三案併記であった。

小泉はその後2003年11月の総選挙において、選挙公約に郵政事業の「2007年からの民営化」を入れるも、2004年7月の参議院選挙が終わるまで、郵政民営化に関する具体的な検討は行わなかった。それは、2004年7月以降、少なくとも三年以上、国政選挙はなく、改革に専念できるからである。そのため、2004年の通常国会までは郵政民営化法案の提出を控え、また、その具体的内容について踏み込んだ議論をすることを避けた。

参院選直後、7月22日から、郵政民営化は経済財政諮問会議で審議が開始された。9月7日の経済財政諮問会議において、経営形態変更の具体的プロセスまで含めた民営化の基本方針が決定され、9月10日に自民党による事前審査の慣行を無視して、閣議決定された。

政府と自民党は郵政民営化に関する検討委員会を設置し、1月26日から実質的な協議に入った。他方、竹中郵政民営化担当相の指示で、郵政民営化準備室に集めた金融庁のスタッフが郵政民営化関連法案概要を2月15日までに作成した。この作成は担当省庁である総務省や、財務省に全く相談なしであった。それ以降、政府と自民党との協議は進まず、膠着状態に陥った。政府は

小出しに譲歩を示すも、特定郵便局長の組織、全特と組合は、これらの譲歩案を拒否した。

調整が進まないことに業を煮やした小泉は、4月4日に自民党の了承を得ない政府案が政府与党会議にかけられた。27日に法案が閣議決定され、総務会で国会提出が了承された。5月20日に衆院本会議で郵政民営化特別委員会の設置が決められ、6月28日には特別委員会を通過した。こうして7月5日に法案が衆議院で採決、可決された。自民党で採決に賛成票を入れなかったのは51名で、法案への反発、反対派小泉の強引な手法への反感が大きな位置を占めていた。

7月13日、法案が衆議院に回されると、小泉は自民党参議院議員の説得を試みるも、参議院では、8月8日、採決、否決された。自民党のうち、22人が反対した結果であり、小泉は、即日、臨時閣議で解散を決定した。政府の最重要法案が否決されたことは、内閣不信任であり、「身体を掛けて国民の審判を仰ぐ」、より具体的には、「郵政民営化に国民が賛成か、反対か聞いてみたい」というのである。

6月下旬の段階で、「本会議で反対票を入れた議員は、総選挙で公認しない。彼らが無所属で当選してきても、復党させない」と、これまでにない強硬な方針を取ることを決めていた。そのため解散と同時に、反対派の出身選挙区には、公募も含め地元へ地縁、血縁のない「落下傘候補」、を対立候補として送り込んだ。この戦術は「刺客」と称されてマスコミの格好の話題となった。マスコミはとりわけ朝、昼の芸能ワイドショーが、刺客がどこまで切り込めるかという時代劇イメージで有権者の興味を煽り、盛んに報道した。ポピュリズム的な選挙のドラマ化に成功したのである。

また、小泉は、郵政民営化という一般有権者には理解の難しい争点である「ハード・イシュー」を一般国民に緊急の課題としてストレートに受け取られる「イージー・イシュー」に転換することで、郵政民営化政策を大衆迎撃的なポピュリスト的政策に見せることに成功した。問題の重要性と、世論の無理解との間のギャップを前に、小泉は以下の4つの議論を展開した。

- ①相次ぐスキャンダルを景気に80年代以前から登場してきた官僚に対する国民の反感を動員して、「郵便局員や郵便局長は公務員として特権・既得権益を享受している」という議論がその一つである。これについて小泉は、キャッチ・コピーを自ら作り、広報活動に利用した(大下 2005)。「郵政公務員27万人の既得権を守って改革ができるんですか、みなさん」というものであった。
- ②小泉はもう一つのキャッチ・コピーとして「自民党をぶっ壊してでも改革をすると、国民のみなさんに約息しました。改革を止めるな」というものを作った。これは相次ぐスキャンダルによって定着した国民の「政党不信」を小泉支持につなげようとする意図が明確である。プロフェッショナル集団としての政党にはマイナスイメージが付着していることを認識し、小泉自らは政党から距離をとろうとする戦略である。
- ③さらに第三には、郵政改革はすべての構造改革の成功にとっての一里塚であり、これに抵抗する勢力は、単なる郵政改革の反対者ではなく、「構造改革」全体の敵対者であるとの論理を展開した。
- ④そして第四には、民主党は背後に労働組合がおり、郵便局員の既得権を守ろうとして、「抵抗勢力」の一部になってしまった、という議論が付け加わる。

以上のいずれの主張も、ハード・イシューをイージー・イシューに転換する戦術である。

これらには、郵政だけを取り上げた争点の単一化がみられる。自民党議員の多くは郵政以外のことに何も触れない小泉と執行部の戦術に不安を持った。しかし、実際には、この単一化、スローガン化こそがこの選挙において、大きな効果を果たしたのである。

選挙結果は、自民党が83人の新人議員も加えて単独過半数を超える296議席を獲得した。

こうして2005年10月11日に民営化の開始時期を半年ずらしただけの郵政民営化法案が衆議院を通過し、そして14日後には参議院でも通過、成立した。

郵政民営化の因果関係分析

以上の、郵政民営化の背景と政策過程の各論点について、推定される因果関係をもとに、図に示すような因果関係図を形成した。推定できた因果関係から郵政民営化のアジェンダの「問題の流れ」がどのような変化をしたのかを考察する。

2005年1月、小泉内閣が通常国会に向けて郵政民営化を再浮上させた時期に行われたインターネットによる政府の意識調査によれば、10の政策課題のうち郵政民営化は第8位であった。しかし、2005年9月の総選挙の際は、小泉は郵政民営化を最大かつ唯一の争点としたことによって、多数の国民の支持を得ている。これは、小泉が彼の主張を一般国民にわかりやすい形で提示したことによるものである。

小泉の主張には、彼が財政の危機、将来の財政破綻を日本政治の最大の問題ととらえていたことが伺える。しかし、財政危機、特に将来予想される危機に、今から対処しようとする小泉の考えは、一般国民には切実な問題とは受け入れがたい問題であった。そのギャップを埋めるために、小泉はキャッチ・コピーを用いたり、郵政民営化を構造改革の本丸であると主張したりすることによって、一般国民が課題をストレートに受け取ることのできるイージー・イシューに転換している。このイージー・イシューへの転換は、巧みな選挙戦略によって劇場化され、より国民に親しみやすいものになっている。

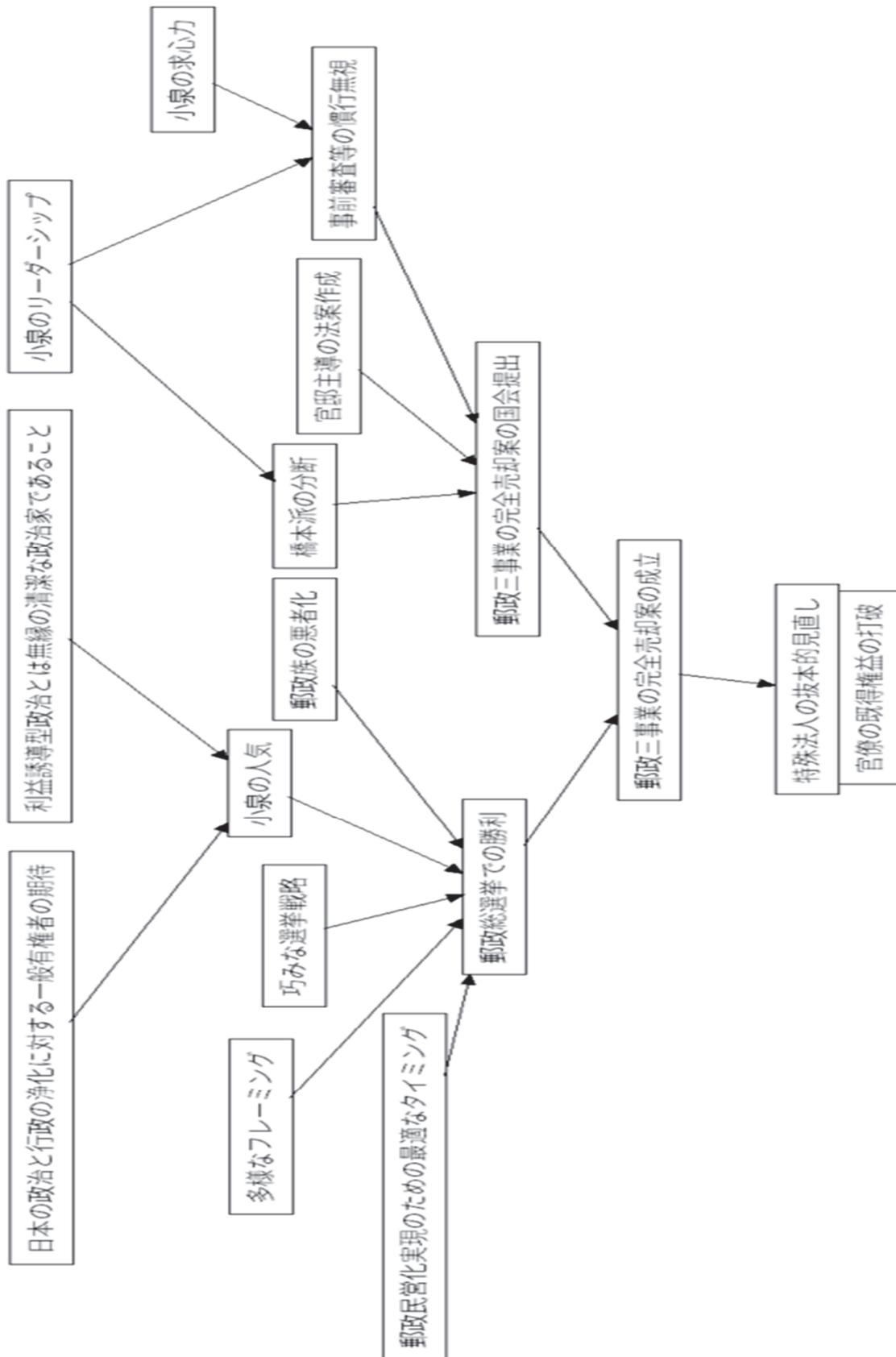


図 4：郵政民営化のアジェンダ・セッティングの因果関係分析図

ゆとり教育

ゆとり教育の概要

1998年の学習指導要領改訂によりゆとり教育が発表され、2002年から施行された。この改訂は、学習内容の3割削減や週5日制というゆとり教育の集大成と言われる大きな改革であり、ゆとり教育の集大成である。ゆとり教育は、戦後の詰め込み教育で「荒れた」学校を改善すること、一人ひとりの能力・適正に応じた教育を進めること、自己教育力を発展させること等を目的としており、1998年の改訂は改善の基本視点として以下の4点を掲げている（文部科学省 1998）。

- ①豊かな人間性や社会性、国際社会に生きる日本人としての自覚の育成
- ②多くの知識を教え込む教育を転換し、子どもたちが自ら学び自ら考える力の育成
- ③ゆとりある教育を展開し、基礎・基本の確実な定着と個性を活かす教育の充実
- ④各学校が創意工夫して活かした特色ある教育、特色ある学校づくり

この基本方針の上で行われた施策は、習熟度別学習などに代表される個に応じた教育の強化等の市場主義につながるような、従来とは異なるものになっている（世取山 2008）。

ゆとり教育の背景

このような、ゆとり教育が実施される背景として文部省内での教育政策に対する意識の変化を説明したい。

1998年の学習指導要領改訂の一つ前に当たる、1989年の学習指導要領改訂ではそれ以外の改訂とは異なり中央教育審議会ではなく、臨時教育審議会の審議が土台となっている。これは、1980年代初頭において、いじめ、校内暴力、不登校、高等学校中途退学者の増加等が、大きな社会問題となる中で、中曽根首相は、教育が重要な課題であるという認識を深めるとともに、文部省を中心とした従来の政策決定プロセスでは、問題の解決につながるような改革を行うことはできないと考えた（ジョッパ 2005）。中曽根は戦後の政策形成体制を打破し、教育理念の包括的な議論を行うことによって未来への展望を開くことを目的とし、1984年に臨時教育審議会を組織している。

文部省の影響力を排除し、従来の理念とは異なる改革を目指したが、文部省の抵抗から、メンバーはその影響を受ける形となり、さらに教育学者が参加しなかったために専門性の低いものとなった（水原 1992）。その結果、臨時教育審議会は文部省に対して想定していたような力を発揮することはできず、委員の間の理念の不一致から、教育理念を再構築することよりも実際的な議論や、実現性の高い問題の議論にとどまることになる。

この臨時教育審議会の登場は、文部省の意識を大きく変化させることになる。臨時教育審議会での議論は精力的な上に、そこから出る案は文部省にとって新鮮なものだった。その影響を受けて、文部省は旧来の政策を守るのではなく、自ら新しい政策を求めるような組織への変革をしている。それまでの文部省は事業を着実に実行し、予算を確保することが本分とされていたが、臨時教育審議会以降は、政策を実現に導く工夫やアイデアを模索する組織に変化していった（寺脇 2013）

その後、1989年の学習指導要領改訂の際は、従来の中央教育審議会での審議に戻り、文部省は自ら教育改革を主導していく。1970年代、1980年代に学校の荒廃が問題とされた際に子どもた

ちへ「ゆとり」を与えることが重要だと考えた文部省だが、この視点は 1990 年台に入っても変わらず中心に据えていた。激しい受験競争のもとで、学習内容の削減のみをしても子どもたちが塾に行くようになるだけであり、真に文部省が掲げるゆとりを実現するためには、社会の受験の捉え方や受験制度を整え、変革する必要があることは文部省も認識していた（鴻巣 2013）。

しかし、文部省に対しては外部から強い要求があった。日教組を中心とするリベラル層は学校完全5日制、学習内容の削減、総合的な学習の時間を導入することを求めている。一方で、与党自民党や財界は財政構造改革の視点から、教育にかかる経費の削減を要求している。財界は他にもエリートを育成するための教育を行う環境を整備することも求めている（山崎 2008）。

以上のような状況のもと、文部省は自らの理念を中心として、リベラル層や財界からの要求を最大限実現することを目指している。「ゆとり」という従来から掲げてきた概念のもとで、リベラル層の求める学校完全5日制と学習内容の削減により、教育にかかる経費の削減を行った。「生きる力」という新しい概念を生み出すことによって、総合的な学習の時間を導入することに正当性がもたらされ、同時に財界が求める自己教育力の向上によるエリート育成を図ることもできた。関係アクターからの要求を盛り込みながらも、「ゆとり」と「生きる力」という概念は文部省が生み出したものとしてこれを強調し、主導権の確保も怠らなかった（寺脇 2006）。

ゆとり教育の政策過程

1989年の学習指導要領の改訂以降の政策過程を説明したい。

1989年に改定された学習指導要領は1992年に施行された。しかし、それ以降も従来から指摘されていた、いじめを中心とした教育の荒廃が問題となっていた。また、1992年以降段階的に学校5日制が導入されていたものの、子どもたちの生活にゆとりは生まれておらず、受験競争も緩和していないという見方が大半を占めていた。さらに、子どもたちの理科離れ等の勉強嫌いも問題として取り上げられるようになっていた（柴田 1999）。

1995年、与謝野馨文部大臣が中央教育審議会に対して、21世紀以降のわが国の教育のあり方について諮問を行っている。その中で、問題意識として国際化、情報化、科学技術の発展、高齢化、少子化、経済構造の変化等、社会の大きな変化について述べられている。このような変化を踏まえた上で、上記のいじめ問題、受験競争の過熱化、科学技術離れの対応が必要であるとしている（中央教育審議会 1995）。

このような問題意識のもと、1995年の中央審議会において新しい学習指導要領の目的を「[ゆとり]の中で、子どもたちに[生きる力]を育てていくこと」（中央教育審議会 1996）と掲げている。1977年の学習指導要領の改訂の際に初めて登場し、1989年の学習指導要領改訂では使用されなくなった「ゆとり」という文言が再び用いられている。この答申の中で学校5日制の完全実施が提唱され、総合的な学習時間を導入することも述べられている。1997年の最終答申においては、大学・高等学校の入学選抜の改善案として推薦入試をさらに推進していくこと等が提唱されている。以上の中央教育審議会での議論のもと、1998年に学習指導要領は改訂された。

ゆとり教育のアジェンダ・セッティングの因果関係分析

1989年の学習指導要領改訂の土台となった臨時教育審議会に影響を受けた文部省は、自ら新し

い政策を求める組織に変革した。その文部省は1998年学習指導要領改訂の際には、1970年代から提唱し続けてきた「ゆとり」という概念と、新しく「生きる力」という概念を組み合わせることによって、教育行政に関わる各アクターの要求を達成しながら、自ら主導して大胆な教育改革を断行した。

異次元の金融緩和

異次元の金融緩和政策の概要

2013年4月3日、4日の金融政策決定会合において日本銀行は、量・質ともに従来とは次元の異なる「量的・質的金融緩和」の実施を決定する。この政策は、デフレ脱却を達成するための第2次安倍政権が掲げる一連の経済政策である、「アベノミクス」の第一の矢である「大胆な金融政策」である。日本銀行は、消費者物価の前年比上昇率2%の「物価安定の目標」を、2年程度の期間を年頭に置いて、できるだけ早期に実現するとし、このために、マネタリーベースおよび長期国債・ETFの保有額を2年間で2倍に拡大し、長期国債買い入れの平均残存期間を2倍以上に延長するなど、量・質ともに次元の違う金融緩和を行うこととした（日本銀行2013）。

これらの決定は従来の日銀が採用した金融緩和とは大きく異なるものとなっている。デフレ脱却へのコミットメントを大幅に強化し、予想実質金利の引き下げにより即時の行動を促すものであった。

異次元の金融緩和政策の背景

このような異次元の金融緩和政策に踏み切るに至った背景について、1970年代以降の経済環境の変化をもとに説明したい。1970年代後半から80年代にかけて、日本銀行が戦うべき相手はインフレであった。日本銀行は物価の上昇に対して、金融引締めを行っていた。それには政治家や大蔵省、経済界が反対することも多かったが、1970年代前半の狂乱物価の記憶も新しかったことから、物価上昇に対する世論の警戒心も強かった。日本銀行は世論を味方にすることで政治的圧力に抗し、金融引締めに踏み切ることができた（上川2005）。

ところが1990年代以降、バブル崩壊による資産価格の急落と、それに伴う長期不況、経済のグローバル化、さらに労働賃金の低迷が起きていた。その結果として、日本経済は物価が上昇しにくい状況になり、ついにデフレに陥ることとなる（吉川2013）。日本銀行は、金融緩和だけでは景気は回復しないと考えていたし、インフレとバブルの経験から、大規模な金融緩和には積極的ではなかった。しかし、物価の安定に責任を持つのは日本銀行であるため、徐々に日本銀行に対し、デフレ脱却策の実施を求める声は高まっていった。さらに、財政赤字の深刻化により、機動的な財政出動は難しいと考えられ、金融政策による景気刺激を求める声は、ますます高まっていった。

これは世界的な傾向であった。世界金融危機以降の欧米諸国は1990年台の日本と同様、物価上昇率が低迷するデysinフレ状況となり、日本のようにデフレに陥るとの懸念が強まった。これに対し各国は、財政出動と金融緩和で対応する。だが、ヨーロッパ諸国で政府債務危機が深刻化すると、金融政策への依存が強まった。そうして、世界金融危機以降の先進諸国の中央銀行は、それぞれ非伝統的な金融政策の実施や新たな政策指標を検討することに、追い込まれたので

ある（藤井 2013）。

かつての先進国では、景気が上昇によって失業率が低下し、賃上げが行われ、それが物価の上昇につながった。このようなインフレ経済のもとでは、物価の上昇こそが経済の安定にとって最大の脅威であり、中央銀行が政治の反対に屈することなく金融を引き締めることが必要であった。それを可能にするためには、中央銀行に高い独立性を付与が必要であった。しかしながら、日本ではバブル崩壊後、欧米諸国でも世界金融危機以降、デフレーションとなり、徐々にインフレではなくデフレが大きな脅威となっていく。このため、反インフレ政策を唱える中央銀行に高い独立性を付与することには、中央銀行としての職務をはたしていないと疑問の声が上がるようになり、リフレ政策の実施を求める声が高まったのである（上川 2014）。

さらに、別の経済要因としてアメリカの金融政策の影響があげられる。日本経済については1980年代以降、内需主導型経済への移行の必要性が説かれていたが、依然として経済成長を輸出に、雇用を輸出企業に大きく依存している。このため、FRBが利下げを行うことによって必要以上に円が高騰している状況下では是正すべく、日本銀行に金融緩和を求める政治的圧力が強まることになる。また日本銀行自身も、そのような過度な円高に対しては金融緩和で対抗せざるを得ないと考えている（田中 2008）。

一方、日本の株式市場では、1990年代後半以降、外国人投資家が主たる買い手・売り手になっており、株価を左右する存在になっている（上川 2014）。したがって、海外投資家がどのように日本の景気の動向を予測しているかによって、株価は上下している。仮に日本銀行が説明するように、ゼロ金利下の量的緩和に実体経済を良くする効果はないとしても、海外投資家が効果はあると考えている限り、大規模な金融緩和が実施されると株価は上昇する。逆に緩和の規模が足りないとみなされると、株価は下落する。このため日本銀行は、株価が下がると金融を緩和せざるを得なくなるのである。

安倍首相が、法人税減税や労働規制の緩和といった、大衆からの支持を集めそうにない政策の実施に熱心なのは、海外投資家が、こうした政策が取られれば景気は良くなると考えているからであり、実際にこうした政策を実施することによって株価が上昇するのだろう。実際、安倍や菅義偉官房長官は、株価が政権の支持率に直結していると見て、海外のファンド幹部と会談し、彼らの日本市場への関心を探っている（朝日新聞 2014年5月18日付朝刊）。安部は、グローバル資本の重要性を認識しているという点で、過去の首相、とりわけ民主党の首相とは大きく異なっている。

また、政治的な背景として、日本銀行の独立性の変化について説明したい。

まず、政権交代によって日本銀行の独立性に予期せぬ効果がもたらされている。自民党一党優位政党として政権を独占していた時代には、政府・与党から日本銀行に圧力が掛けられると、野党は日本銀行の独立性を尊重し、政府・与党を批判した。世論に強い影響力を持つマスメディアも、政府・与党には批判的な立場を取り、日本銀行を擁護した。だが、野党時代に日本銀行の独立性を尊重してきた民主党は、政権に就くと日本銀行に金融を緩和するよう繰り返し圧力をかけるようになる。一方で、日本維新の会、みんなの党といった日本銀行に批判的でリフレ政策を主張する政党が、民主党の凋落にあわせて影響力を強めていく。その結果、日本銀行を擁護する政治勢力はいなくなり、日本銀行はデフレの責任を一身に負わされ、その独立性は低下していった

のである（上川 2014）。自民党総裁となった安倍が 2012 年衆議院総選挙の際に、さらに政権奪取後、その独立性を否定するほど強力な圧力を日本銀行にかけたことに対して、強い抵抗が起きなかったのは、そのためである。

日本銀行が独立性を失った第二の政治的理由としては、逆説的ではあるが、1997 年の日本銀行法改正により日本銀行の法的独立性が向上したことがあげられる（清水 2004）。以前は政治との調整を政治力のある大蔵省が引き受けてきたのだが、独立性が向上した結果、政治との調整に不慣れた日本銀行自らが、政治との調整を行わなければならなくなったため、政治からの風当たりが強まったと考えられる。また、独立性が強化された日本銀行に対して、政府の権限を強める方向で日本銀行法を再改正するという圧力を政府・与党がかけられるようになったからとも考えられる。日本銀行に、独立性という守るものができてしまったため、かえって政府・与党に圧力をかける手段を与えてしまうことになったのである。

第三に、より構造的な政治要因としては、日本の議院内閣制が従来のコンセンサス型からウェストミンスター型へ変わりつつあることが挙げられる（待鳥 2012）。ウェストミンスター型の国では、権限が首相に集中する。中央銀行に政府からの独立性を認めることは、このようなウェストミンスターの原則とは相容れないと考えられている。日本では 1990 年代以降、首相の指導力を強めるために英国を模範として政治制度改革が進められた。1994 年には衆議院の選挙制度が小選挙区比例代表並立制に変更され、2001 年の中央省庁再編では、内閣官房の強化、内閣府の設置など、内閣機能の強化がされた（笠 2006）。

こうした首相への権力集中。言い換えると首相への責任集中が進んだことで、首相が金融政策への介入を強めることに対し、世論の批判が弱まった可能性がある。事実上、国民が選んだ首相に権力が集中する仕組みがとられ、首相が指導力を発揮することが望まれているのに、首相は金融政策に介入してはならないというは、国民感情からすれば奇妙なことに思われるだろう。また首相からすれば、景気が悪化すれば首相の責任が問われるのに、景気に大きな影響を与える金融政策に介入できないのは納得いかないということになるだろう（上川 2014）。

これまで見てきた日本銀行の独立性に影響を与える要因に対して、日本銀行は常に受動的だったわけではない。しかし、総じて言えば日本銀行は金融緩和に消極的で、景気対策に熱心でない印象を与える結果となった。また、景気が回復すると将来の景気を楽観視して、すぐに金融を引き締めようとした。このような振る舞いが、日本銀行に対する政治家や世論の不信感が高めることになり、独立性の剥奪を導いたのである。

異次元の金融緩和政策の政策過程

本説は上川（2014）を参考に異次元の金融緩和政策について政策過程を再構成したものである。

2012 年 11 月 16 日に衆議院が解散され、選挙戦が始まると、安倍の発言に注目が集まるようになる。「政権をとったら日銀と政策強調し、2%、3%のインフレ目標を設定する」、「輪転機をぐるぐる回して、無制限にお札を刷る」等の金融緩和に関する発言を、安倍は連日繰り返した。自民党の選挙公約においても、政府・日本銀行の協定で物価上昇率 2%の目標を設定することや、日本銀行法改正も含めて政府・日本銀行の連携を強化していくことが明記された。

民主党は安倍のこうした強硬な姿勢の批判を強めるものの、民主党もこれまで日本銀行に執拗

に追加緩和を求めており、自民党との違いは不明確で、批判は正論ではあったが、説得力に欠けていた。

選挙結果は、自民党・公明党の圧勝であった。安倍は投開票日の12月16日に「今月決定会合がある。我々の主張をどのぐらい理解しているのか」と日本銀行に迫った。12月18日に白川は自民党本部で安倍と会談する。安倍はその場で、2%のインフレ目標に向け、政策アコードを結ぶことを検討するように要求した。

市場も安倍の勝利を歓迎した。12月17日にオセアニア市場では、円相場が一時、一年八ヶ月ぶりの安値である84.48円/ドルとなり、19日の東京株式市場では日経平均株価が8ヶ月ぶりに1万円台を回復した。野田の衆議院解散表明後、約1500円も上昇したのである。

この結果、日本銀行は、政治だけではなく市場の圧力も受けることになった。個々で日本銀行が動かなければ、金融緩和を期待した市場が失望し、一気に株安・円高に反転するかもしれない。そうなれば日本銀行への風当たりはますます強くなるだろうからである。

さらに、ここで安倍に逆らえば、総裁・副総裁にリフレ論者を送り込まれるだけではなく、日本銀行法の改正にまで追い込まれる危険性があった。日本銀行は安倍の要求を全面的に受け入れざるをいかなかった。12月20日の金融政策決定会合で日本銀行は、「資産買入れ等の基金」の増額、「貸出増加を支援するための資金供給」の詳細の決定、「中長期的な物価安定の目途」についての検討の指示を行った。2013年1月22日安倍内閣の下で初めて開催された金融政策決定会合で日本銀行は、「物価安定の目標」を導入しその目標値を、自民党の選挙公約通り消費者物価の前年比上昇率2%とすることを決めた。また日本銀行は金融緩和を推進し、この物価目標をできるだけ早期に実現することを目指すとした。白川が、これまで反対してきた物価目標2%の導入を受け入れたのは、「日銀法改正を阻止したい一念」によるものとみられる。金融政策決定会合後、日本銀行と政府は共同声明「デフレ脱却と持続的な経済成長の実現のための政府・日本銀行の政策連携について」を発表する。

2月5日白川は任期満了の4月8日をまたずに3月19日で辞任する意向を表明する。2月28日、安倍は黒田を総裁候補、岩田規久男を吹く総裁候補として国会に提示する。もう一人の副総裁候補として、日本銀行は山口の留任と望んだ。しかし安倍は、「正副総裁三人共交代し、人心を一新したい」として、この提案を受け入れず、日本銀行内からは国際担当理事の中曾宏が上席の副総裁候補として国会に提示された。

この人事について3月15日に参議院本会議で国会からの承認を得る。このとき、みんなの党が財務省OBの総裁起用に反対していたため、民主党が反対すれば参議院で黒田総裁は不同意となった。だが民主党は、日本銀行法改正を主張する磐田の副総裁就任については不同意としたものの、黒田の総裁就任には同意する。党内にはアベノミクスを疑問視する声が強くなり、黒田への反対論もあったのだが、「反対して総裁が空白になるのは問題」として、同意と決めた。

その後、総裁に就任した黒田は、日本銀行職員に「これまで以上に資金量を出す」、「リスクを恐れず政策を打つ」と命じ、総裁就任後、初めてとなる4月3日、4日の金融政策決定会合で日本銀行は、量・質ともに従来とは次元の異なる「量的・質的金融緩和」の実施を決定する。

アジェンダ・セッティングの要因分析

以上の、異次元の金融緩和政策の背景と政策過程の各論点について、推定される因果関係をもとに、図に示すような因果関係図を形成した。推定できた因果関係から異次元の金融緩和政策のアジェンダの「問題の流れ」がどのような変化をしたのか考察する。

解決すべき問題として円高・デフレ不況に注目が集まった要因として、長期的には、日本の産業構造が輸出に依存していること、バブル崩壊後のデフレーション経済からの脱却を図ることができずデフレが脅威になったことが挙げられる。そのため、以前にも金融緩和策を日本銀行が実施することもあった。この長期的なトレンドに合わせて、FRB と ECB が前例のない金融緩和政策を行ったことによる、戦後最大の円高となったことが、金融緩和政策を求める声の増大につながり、異次元の金融緩和という大胆な政策につながったということが考えられる。

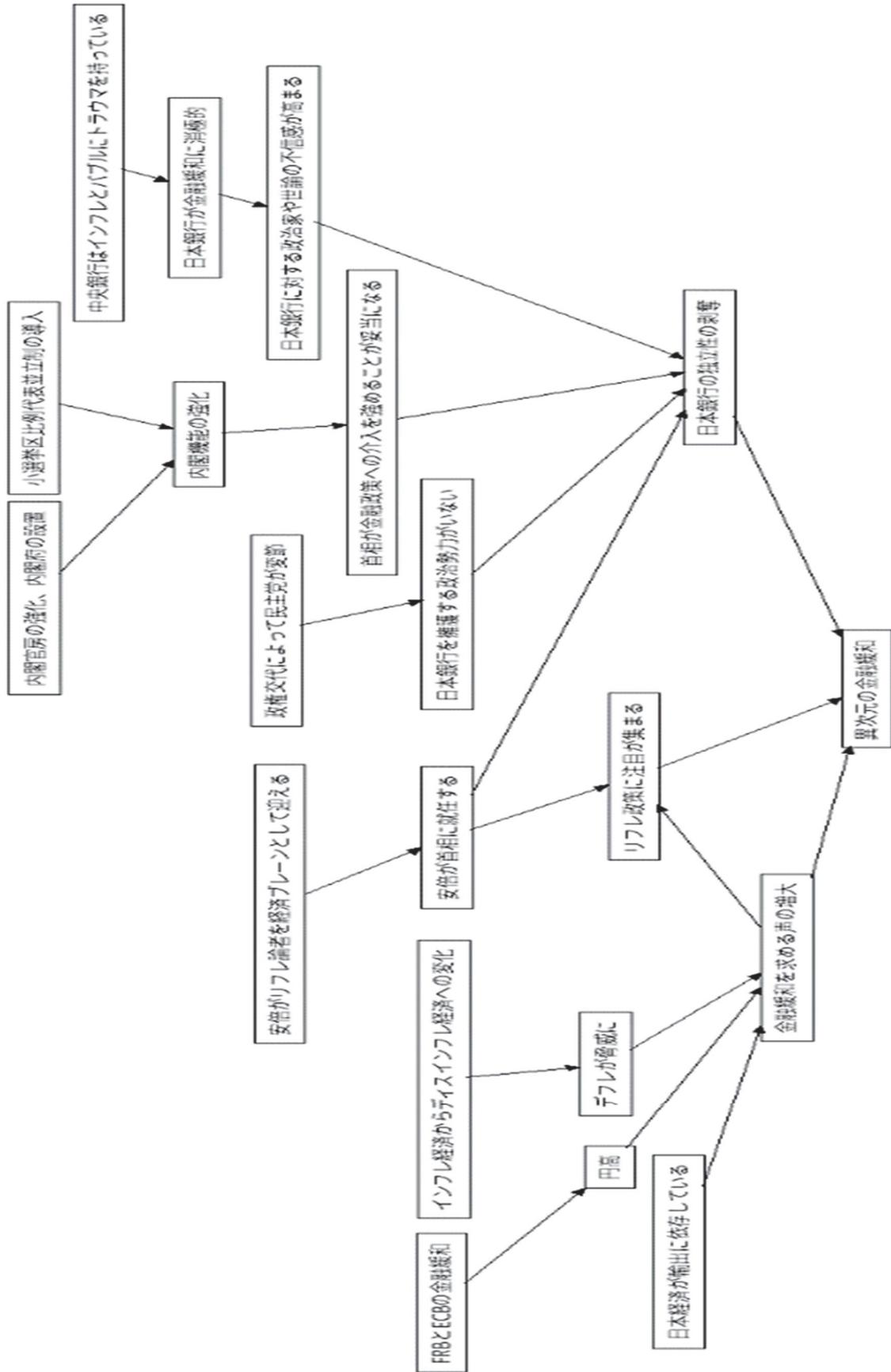


図 5：異次元の金融緩和政策のアジェンダ・セッティングの因果関係分析図

ドイツの脱原発

ドイツの脱原発の概要

ドイツでは1998年10月に誕生した社会民主党（SPD）と90年同盟・緑の党（以下、緑の党と表記）の連合政権が、連立協定に従い、電力業界と脱原発の条件をめぐって交渉を行い、2000年6月に基本合意に達した。その要点は、既存の20基の原子炉を一基平均32年の運転期間で段階的に廃止し、また使用済核燃料の英仏への再処理委託を2005年6月末日までに止め、以後は直接最終処分限定することであった。

ドイツの脱原発の背景

2000年6月に基本合意に達したドイツにおける脱原発の背景について、シュレーダー政権が樹立した要因と、1994年に原子力法改正され核廃棄物の直接処分が認められるようになった要因に分けて説明していく。

1998年に赤緑連立連邦政府であるシュレーダー政権が樹立した直接的な理由としては16年に及ぶコール政権への「飽き」が支配的であるとされている（小野 2014）。しかしながら、新しい社会運動に起源を有する緑の党が権力の中核に到達しえた要因の一つとして、ドイツが連邦制をとっていることが挙げられる。連邦制の下では、州政府や裁判所の第一審、地方の政党や労組の組織において、中央レベルとは異なる意見が許容される余地が大きい。州議会選挙を始めとして、国民の意思を示す多数の機会もある。州政府は原子力施設の許認可権限を持つとともに、大手電力会社の経営にも関与してきたため、州の政治が原発問題にとって重要な焦点にもなった（若尾・本田 2012）。

このことは、政党内において異端な意見を主張する人が立ち上がりやすくしている。例えば、社会1980年当時において、社会リベラル政権の研究・技術相を退いたフォルカー・ハウフ（SPD）はすでに、高速増殖炉に批判的だった。そのころからSPD内部において原子力エネルギーに批判的な少数グループがあった。その後1982年に野党に転落したSPDは原子力への批判姿勢を強めることとなった（坪郷 2013）。

野党に転落してから4年後の1986年4月にチェルノブイリ原発事故が発生した。翌月、ハンブルクでの労働総同盟（DGB）の大会では「できるだけ早期の」脱原発を要求する同義を採択した。これはユンクの『原子力帝国』が、フランスのラ・アージュ再処理工場での劣悪な放射線管理や環境汚染、被曝労働を押しつけられる派遣労働者、原子力施設の武装警備や労働者の厳しい身元調査に光を当てたことで、原発関係の労働環境が問題視されたことも背景としてあった（本田 2014）。8月のニュルンベルクでのSPD連邦党大会も、10年以内の脱原子力を要求する決議を採択した。こうした議論は1989年に採択されたベルリン綱領に結実する。この多様な利害関係を包括するSPDという大政党が脱原発で均衡点を見出し得たのは、チェルノブイリの事故の影響だけではない。SPDの場合、伝統的支持基盤である労働組合を無視することはできない。景気低迷や雇用機会損失につながりかねない脱原発路線へ支持調達として、SPDは早い段階から労働組合との新しい関係を模索している。1985年には「労働と環境」特別大会を開催し、十分な環境保護と技術革新を通じた雇用創出を打ち出そうとしている（坪郷 1989）。

また、国民の意思を示す機会として州議会選挙が多くあり、赤緑連立連邦政府成立以前に州レベルでの連立を経験することは重要であった（小野 2014）。ヘッセン州では、85年12月、緑の党のヨシユカ・フィッシャーが環境大臣として入閣する。当時、SPDと緑の党の隔たりは大きかったが、ハーナウの原子力施設に関して妥協の見通しが生まれたことが、史上初の赤緑連立州政府の誕生に道を開いた。だが、数カ月後のチェルノブイリ原発事故後、アルケム社の操業許可をめぐる両党関係は決定的に悪化する。議会は解散され、選挙の結果CDUとFDPの連立政権が成立した。このような連立政権での失敗は、連立連邦政府の成立だけでなく、その後の脱原発交渉にも生かされている。急進的な環境保護運動に端を発する緑の党であるが、こうした経験から2000年前後には党内でも現実主義が優勢になりつつあり、交渉を通じたプラグマティックな撤退路線を確立するようになる（小野 2014）。

以上のように、SPDが脱原発を決議したことや、SPDと緑の党とが州レベルの連立経験を得ることができたことが、赤緑連立連邦政府の成立に寄与している。そして、これら2つが起こり得たのはドイツが連邦制であったことが大きく影響している。

次に1994年に原子力法が改正された要因を説明していきたい。この改正は電力業界の要求を受け、エネルギー関係法規の一括改正案の一部として連邦与党で賛成多数で成立したものである。それには再生可能エネルギー発電の買取価格の引き上げも含まれている。電力業界が直接処理への選好を高めたのは、再処理にかかるコストが増大したからである。それは1989年4月に大手電力企業であるVEBA社がヴァッカーズドルフ再処理工場の建設を断念し、フランスに委託する再処理の量を拡大する意向を表明したからである。その結果、核廃棄物の再処理をするための政治的財政的コストが大幅に高まったのである（本田 2014）。

以下のヴァッカーズドルフ再処理工場に関わる政治過程は本田（2014）に紹介されたRudig（1994）にもとづいて概説している。

VEBAがヴァッカーズドルフ再処理工場の建設を断念したのはチェルノブイリ原発事故や全国の反原発運動の積み重ねから政策の執行が遅れたからである。ヴァッカーズドルフでの再処理工場建設計画は1980年台に最も紛糾した反原子力闘争である。予定地は州やバイエルン電力（BAG）が所有しており、州の政治はCSUの一党優位だった。初代連邦原子力相だったフランツ・ヨーゼフ・シュトラウス州首相は、再処理工場の建設を強力に推進した。BAGも出資するドイツ再処理会社DWKは1985年2月、正式に建設を決定した。9月州環境省が原子力法にもとづく第1次部分認可と即時執行命令を出し、行政裁判所は12月に予備工事の着手を始めた。

炭鉱や鉄鉱山の閉鎖で経済が停滞するヴァッカーズドルフ村は建設を歓迎したが、周辺自治体で強い反対運動が起きた。1984年2月の最初の聴聞会では約5万2,000人文の意義が申し立てられた。1985年10月にはミュンヘンで5万人のデモが行われ、全国的な反原発グループも支援に入った。また敷地占拠が1985年8月と12月に試みられるが警察に排除される。1986年3月末のデモでは「外部」の若いデモ隊に若干の地元民が加わり、警察と衝突した。チェルノブイリ原発事故後は1万5,000人が現地でデモを行い、5月にはデモ隊の一部が警察と衝突して数千人が負傷し警察はヘリコプターからガス弾を投下して議論を読んだ。警察は反テロ法を含む法律を総動員して反対運動を抑えこみにかかった。それでも1987年10月のデモには3万人が参加した。1987年4月、バイエルン行政裁判所は第1次部分設置認可を無効と判断しながらも、敷地での予

備工事の差し止めは却下し、翌年1月には地下水汚染対策の不備を理由に土地利用計画を無効と判断した。しかし、個別部分の工事は続いた。DWKが1988年1月に原子力施設建設の第2期部分の認可を申請すると、国境を接するオーストリアの反原発グループは41万人、ドイツの反原発グループは47万人、合計88万1,000人の反対署名を集め、州政府に提出した。その聴聞会は7月から8月にかけて23日間審議されたが、州政府の判断に変化はなかった(Rudig 1990)。

しかし、1988年10月バイエルン州首相シュトラウスが死去したことにより、建設計画の強力な推進力を失う。さらに、電力会社VEBAは、度重なる反対運動や裁判によって再処理工場の建設計画が大幅に遅れていることや、シュトラウス首相手動によるバイエルン州の反対派の抑えこみが強硬すぎて、原子力政策全体が立ちゆかなくなる恐れがあることから、1989年4月に再処理工場の建設を断念する(本田 インタビュー)。

このような状況下で、ドイツの原子力産業の展望は悪化していった。1989年の1月にはドイツ最後となる原発が運転を開始し、原発の建設工事は全くなくなっていた。さらに、いくつかの州で明確に脱原子力を掲げるSPD主導の州政権が選出され、原子力法上の安全規制を厳格に適用し、原子力産業に打撃を与えていた。(小野 2014)

その後、連邦首相コールは1992年10月に原子力に関する超党派の合意の可能性を検討するため、政党の代表者他の対話をエネルギー業界に提案している、これを受け、VEBAとライン・ヴァストファーレン電力(RWE)はコールに、原子力を長期的なエネルギーの選択肢の1つとして残すことを前提とした上で、直接最終処分を廃棄物処理法として認知することなどを提案する書簡を送っている。この流れのもとで、1993年3月にエネルギー・コンセンサス部会が開始された。この部会は参加者間に歩み寄りがなく10月に決裂したものの、電力会社の影響を受け、直接最終処分が認められるようになる(本田 2014)。

以上のように、エネルギー・原子力分野に対する国民の高い問題意識からなる粘り強い反原子力運動がヴァッカーズドルフ再処理工場ならびに、原子力発電所を建設することのコストを増大させ、電力会社は直接最終処分や原子力発電所を建設しないという選択を取るようになる。このことによって、赤緑連立連邦政府の樹立後に脱原発の交渉を電力会社とする際にアジェンダが原発の稼働年数のみへと絞られ、合意形成を促進させる要因となっている。

ドイツの脱原発の政策過程

ドイツにおける1998年連邦議会選挙の結果、コール保守リベラル政権からシュレーダー「赤と緑」の連立政権へと戦後初の与野党が入れ替わる政権交代が行われた。ドイツにおいては、選挙後、連立の組み合わせを決めた上で、連立する政党間で、各政党のマニフェストを基にして、任期の4年間で実施する政権政策に関する連立協定の協議を行う(坪郷 2013)。この段階で、両政党の政策が異なる場合、妥協案が作られ、場合によっては1年後に合意をすることを決めるなど、政策調整が行われる。つまり、政権発足までに、各政党の選挙綱領から政権政策への作り直しが行われる。この連立協定の協議は、1ヶ月から数ヶ月に及ぶ場合もある。連立協定の締結後に、政権が発足する。

さて、赤緑連立連邦政府の発足前に、連立政党間で連立協定とともに、政権発足後100日で実現する重点政策を盛り込んだ「100日プログラム」が締結された。SPDと緑の党によって締結さ

れた連立協定 (SPD und Grune 1998) において、「原発なしの新しい将来性のエネルギー・ミックスへの道」をエネルギー産業と合意の上で選択することと、「脱原発を実現する 3 段階シナリオ」が明記されている。まず、連邦原子力法を改正し原発の安全審査強化と放射性廃棄物の発電所施設内保管を義務付ける。続いて連邦政府は、1 年以内に電力会社と協議する。第 3 段階では、損害賠償なき撤退を定めた法律を施工する。

100 プログラムは政権内の確執もあって挫折したが、その後、連邦政府は漸次的な脱原発の可能性を探ることとなる。電力業界との交渉は水面下で続けられたが、焦点となったのは撤退完了までの期間である。難航する話し合いに事態打開の見通しが出てきたのは、99 年 11 月末のことである。新しい案では原子炉の操業年数が 30 年とされ、第 1 合の運転終了までに 3 年の猶予期間が認められる。この「30+3」案は妥協の限界線だったが、12 月、緑の党はこの案に同意した (小野 2014)。法廷闘争をちらつかせていた電力業界にも歩み寄りが見えた。

こうして 2000 年はじめのこと、脱原発交渉が再開された。ノルトライン・ヴェストファーレン州議会選挙で赤緑連立が再選を果たすと、話し合いは加速する。シュレーダー首相は 6 月 14 日に最終案を提示、その夜のうちに合意は成立した。この交渉には、連邦首相、ヴェルナー・ミュラー経済相、ユルゲン・トリッティン環境相、および電力会社数社の責任者が参加した。

ドイツの脱原発のアジェンダ・セッティングの因果関係分析

以上の、ドイツの脱原発の背景と政策過程の各論点について、推定される因果関係をもとに、図に示すような因果関係図を形成した。推定できた因果関係からドイツの脱原発の問題の流れがどのように変化したのか考察する。原子力発電に関わるコストが反対派の運動などによって増大したことにより電力会社の原子力発電への選好が弱まり、脱原発へとアジェンダが徐々に絞られていったと考えられる。

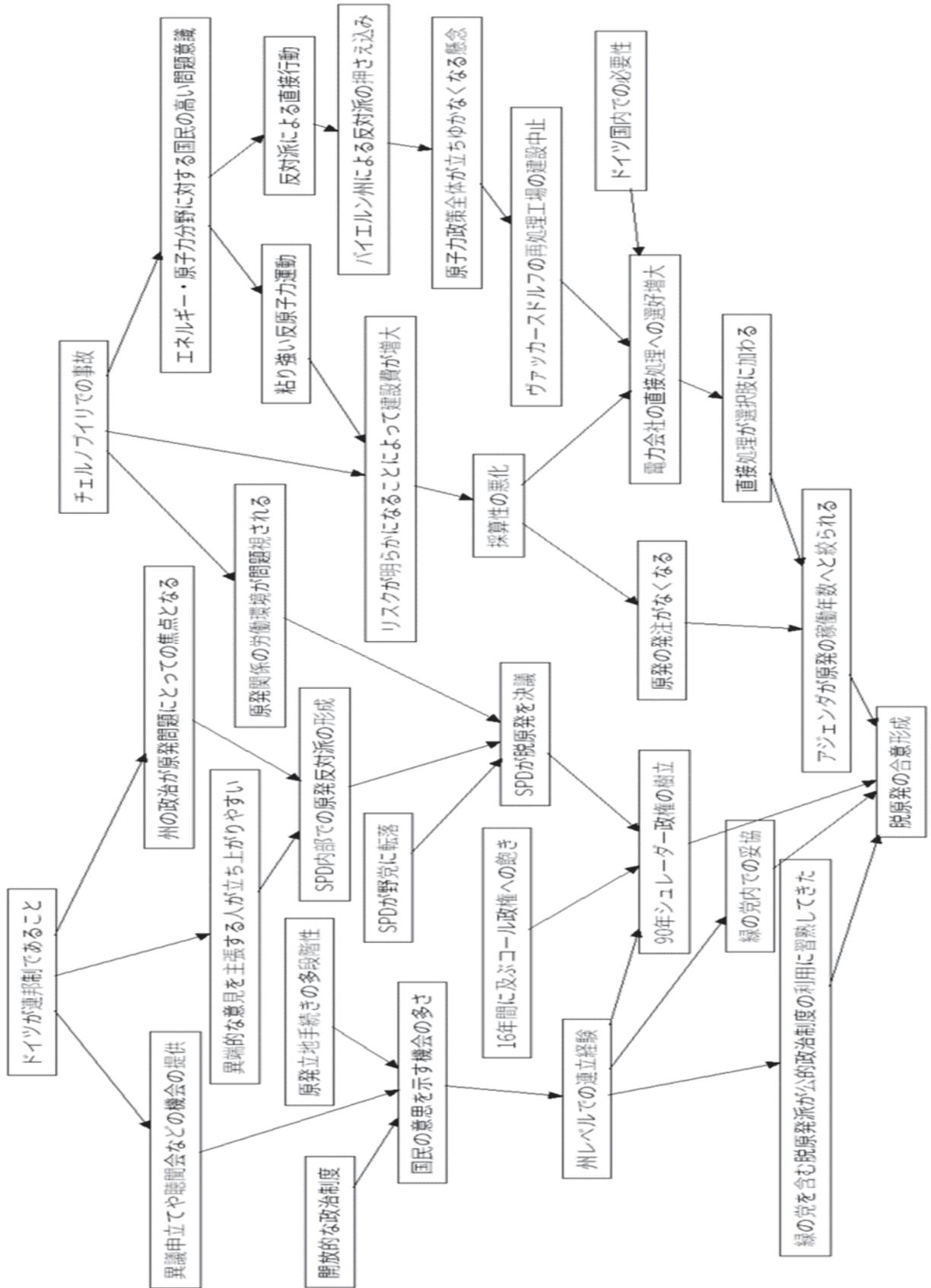


図6：ドイツの脱原発のアジェンダ・セッティングの因果関係分析図

ドイツの脱原発の再決定

ドイツの脱原発の再決定の概要

2011年6月6日の閣議において、原子力発電の推進派の政党であったCDU/CDSとFDPからなる、メルケル連立政権は原子力エネルギー法の改定により、「2022年までに段階的廃炉」を行うことを決定した。最終的に原発の稼働期間の延長を撤回し、古い原発の廃棄と2022年までに順次すべての原発を廃棄する「脱原発の政治的決定」を行った。これは、シュレーダー政権による「脱原発の政治的決定」に立ち戻ったのであり、再度の「政治的決定」であった。

このときに、ドイツの「40年以上にわたる原子力利用についての政党間、市民の間での論争が終結した」と言われている。

ドイツの脱原発の再決定の背景

メルケル首相は2011年3月11日に起きた東日本大震災によってもたらされた福島第一原発事故を受け、迅速対応を行った。これについてフクシマの映像がメルケル首相の脳裏に焼き付いていたというエピソードがしばしば紹介される（小野 2014）。だが、いかなる動機にもとづくにせよ、政治的な計算があったことも確かだろう。2011年3月の後半に2つの州議会選挙が迫っており、選挙への影響が懸念されたのである（坪郷 2013）。市民の間には、1986年のチェルノブイリ原発事故の際の放射能汚染が思い出され、市民の動きも活発であった。ドイツ環境保護・自然保護同盟を始めとする環境団体によって共同で組織された脱原発の大デモンストレーションが、3月26日に4大都市で開催され、全体で25万人が参加した。そして、3月27日に行われたバーデン＝ヴュルテンベルク州の州議会選挙では、緑の党が第2党に躍進し、CDUが交代した結果、緑の党から初めて州首相が生まれ、緑の党とSPDの連立州政府が誕生した。

このような状況の中で、メルケルは政治家としての鋭い直感力によって、福島事故が座標軸の変化をもたらし、有権者の感情を大きく動かすことを察知した。だからこそメルケルは、純粹に市民の健康や財産に対するリスクを減らすためだけではなく、政治的な生き残りのためにも、心のなかで原子力発電所を廃止することを固く決意していた（坪郷 2013）。メルケルにとって脱原子力という結論はすでに決まっていたが、首相が独断で決めたと構成の人々から批判されないように、原子力について厳しい見方を持つ知識人を集めて倫理委員会を作り、急遽、提言書をまとめさせたのだろう。

倫理委員会のメンバーは、学識経験者ではあっても原子力やエネルギーの専門家ではなく、特定の利益を代表するものでもない人たちから構成されていた（小野 2014）。もちろんその提言に法的拘束力はなく、首相はそれを参考意見として聞き流すこともできたはずである。しかしメルケルは脱原発に好意的な世論、メディア、選挙結果などに直面して、所属政党の伝統的経路とは異なり、この倫理委員会の提言に耳を傾けた。それは、前例踏襲型の行動をとりがちな政策エキスパートの影響力を封じ、世論の変化に敏感であろうとしたことの表れである。いわば、政策エキスパート間での調整よりも一般公衆を対象にしたコミュニケーション的手法に頼った改革である。

メルケルがこのような従来の政策形成過程とは異なる手法を利用したのは、1995年3月にコー

ル政権下で行われたエネルギー・コンセンサス会議の議長を行った経験が生きていると考えられる（本田 2014）。このエネルギー・コンセンサス会議は原子力に関する超党派の合意の形成を目的として連邦首相のコールのもとで開催されたもので、連邦と州・政党・利害関係団体によるコーポラティズム的な交渉の枠組みだった。しかし、それ故に利害対立を乗り越える事ができず、6月には決裂している。このことから、利害関係者を極力除いた委員会の提言を重要視したのだと推定できる。

ドイツの脱原発の再決定の政策過程

福島原発事故を受け、メルケル首相は2011年3月14日に原発運転期間延長を凍結し、翌15日には旧式炉7基を3ヶ月間停止すると発表した。メルケル政権は、環境省内部にある原子炉安全委員会において国内全ての原子力発電所の安全性を検証することを決定し、またメルケル首相は、将来的なエネルギー政策の方針を決定することを目的として、原子力発電のリスクを改めて評価するための委員会である「安全なエネルギー供給のための倫理委員会」を設立する。委員会の委員には、原子力の専門家は選ばれず、コール保守リベラル政権に環境相を努め、国連環境計画で活躍したクラウス・テッパーとドイツ学術協会会長のマティーアス・クライナーを共同議長とした。メンバーは、政治家、宗教家、起業家とともに、リスク社会論を展開してきた社会学者ウルリッヒ・ビック、環境政治学者ミランダ・シュラーズらにより構成された。この委員会を設立した理由は、2010年の「原発稼働期間の延長」を取り消し、シュレーダー政権において既に決定していた「2021年までの脱原発」に立ち戻るために新たな根拠を上げる必要があったからである。その際に、「倫理の観点」が持ちだされた（小野 2013）。

この「安全なエネルギー供給のための倫理委員会」当初から、委員会の議論の公開性・透明性を明示し、環境団体を含む専門家や多様な団体代表から広範囲なヒアリングを行い、それを公開した。倫理委員会は4月4日から活動を始め、2ヶ月間の集中審議を行い、5月30日に最終報告書を提出した。委員会は「即時の脱原発」も含めて検討し、「10年以内に核エネルギーの利用からの撤退が可能である」ことを提言した。この報告書では以下の4つの点が指摘されている（坪郷 2013）。

- ①日本のような高度技術国で原発事故が起こったことにより「原発事故というリスクが具体的に起こりうる」という意味で、リスク認識を変えたこと
- ②原発にかわるリスクの少ない技術があること
- ③脱原発は産業・経済の競争力を脅かさないように設計可能であること
- ④核廃棄物の処理と放射能の影響は何世代にもわたるものであること

メルケル政権はこの報告書を受けて、政府与党幹部協議で脱原発の基本線を決定した。運転休止中の原発8基は再稼働させず、残る9基は2015年から2022年にかけて5段階で運転終了する。すなわち、全原発停止時期は赤緑連立次代の脱原発合意とほぼ同じである。この法案は6月30日に連邦議会で可決され、7月8日には連邦参議院でも承認された。

ドイツの脱原発の再決定のアジェンダ・セッティングの因果関係分析

以上の、ドイツの脱原発の背景と政策過程の各論点について、推定される因果関係をもとに、

図に示すような因果関係図を形成した。推定できた因果関係からドイツの脱原発の問題の流れがどのように変化したのか考察する。

日本という高度技術国でも原発事故が起きたという事実から、原発事故が現実に起こるものとしてリスク認識が変わった。その中で、一度撤回した脱原発路線に立ち直るために新たな根拠を必要であった。原子力発電のようなシステムリスクにおいて倫理判断力がリスクマネジメントに必要であるとの認識のもと、「安全なエネルギー供給のための倫理委員会」が設置された。

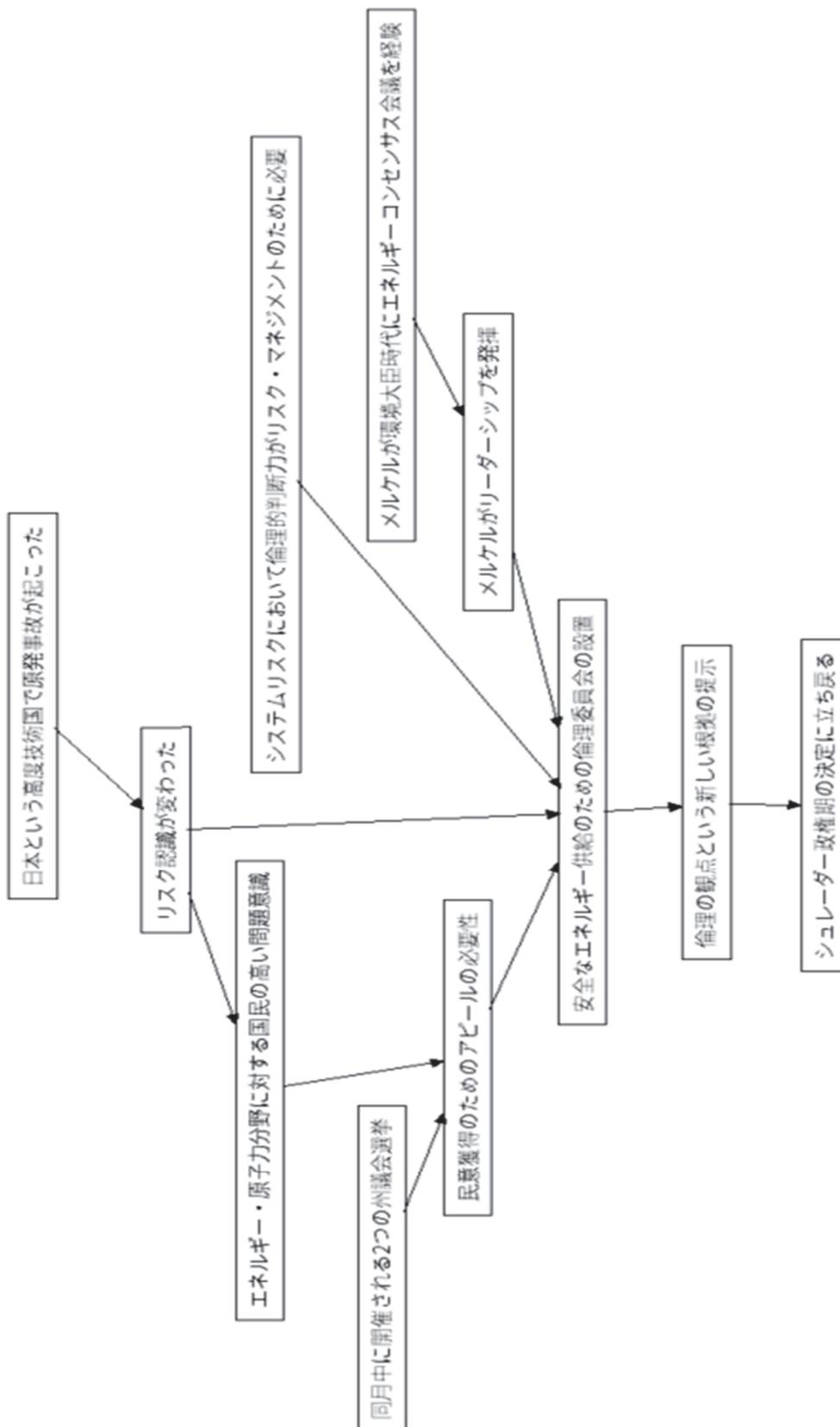


図7：ドイツの脱原発の再決定のアジェンダ・セッティングの因果関係分析図

1990年入管法改正

1990年入管法改正の背景

日本の政治家の日系人認識は「海外の経済発展や海外と日本との友好関係に貢献している」といったように、国家の経済発展に視点を置いたものである。日系人への関心は、日系人労働者のデカセギ現象が事件として表面化した後、むしろ非熟練労働者導入の代替措置として高まった。しかしながら、日系人労働者導入の議論は国会など表にはなかなか出てこなかった。そこで、日系人が労働者として注目されるに至った経緯を時系列で整理し、入管法改訂作業の背後での日系人をめぐる動きがあったことを確認したい。

法務省は、1982年にインドシナ難民受け入れ及び難民条約批准に伴い「出入国管理令」（1951年制定）を「出入国管理及び難民認定法」へと改定した。これに伴い「出入国管理及び難民認定法施行規則」も改定され、その第2条第1号に「日本人の配偶者又は子」という新たな在留資格を定めた。それまで「在留資格 4-1-16-3」（法務大臣が特に在留を認める者）という残余カテゴリーに入れられていたものを、「在留資格 4-1-16-1」（日本人の配偶者と子）とう独立したカテゴリーに移したのである。このカテゴリーは婚姻や親子といった身分関係にもとづく在留資格であるため、在留活動については永住許可同様制限がなく、あらゆる業種で就労が可能である。期間も最長3年で延長も可能である（入管協会編 1989）

日系人のデカセギ就労が開始されると、この在留資格はその重要性を増す。日本国籍保持者は日本人として就労することができたが、その子や配偶者である日系人にはこの在留資格が適用された。さらにそれ以外の外国籍の日系人には、前述の「在留資格 4-1-16-3」（法務大臣が特に在留を認める者）という残余カテゴリーが適用されたが、弾力的運用によって「日本人の配偶者と子」の拡大解釈として扱われたため、活動に制限のない在留資格が与えられた。また1985年に国籍法が改正され、父母両系血統主義が採用されたことも、日系人にとって重要な問題であった。この時点で日系人のデカセギ就労の法的基盤の一部はすでに出来上がっていたと言えよう。

デカセギの日系人労働者が注目を浴びたのは、悪質な斡旋業者発覚の報道によるものであった。そもそも日系人労働者のデカセギ斡旋を始めたのは、横浜の三協工業と言われている。三協工業は1982年頃から日本人労働者の派遣を始め、1984年秋ごろから日系人の日本での就労斡旋を始めたという。1987年11月には労働者派遣事業法違反の容疑で立ち入り調査を受け、1988年3月には改善の行政指導を受けたが、ブラジル事務所のみ閉鎖し、派遣業は続けていた。そして1989年10月に摘発を受け、社長ら2人が労働者派遣事業法違反で逮捕されると（藤崎 1991）、日系人労働者のデカセギ現象は事件として表面化し、注目を集めることとなった。

さらに「在留資格 4-1-4」（親族訪問目的の観光ビザ）のまま、資格外就労を行っていた日系人労働者の存在も問題となっていた。1989年2月には、サンパウロ州の下本八郎州議員が来日し、日系人への就労ビザ発給を日本政府関係者へ伝えたが「二世といってもブラジル人なので、特別措置はできない」と外務省幹部に断られている。当時政府関係者は、日系人の就労を制限する姿勢を示していた（藤崎 1991）。5月の海外日系人大会では、日系人労働者の処遇改善を訴える要望書が提出されている。6月に状況は転換し、出先公館と入国管理局とが業務の一部分担で合意し、それまで悪評を買っていた現地での査証手続きが簡略化される。これは日系人デカセギ就労

を黙認するという政策転換と受け止められている（藤崎 1991）。一方日本では1989年12月に日系人労働者の組織的雇用を目的として、群馬県大泉町周辺の中小企業32社が参加する「群馬県東毛地区雇用安定促進協議会」が設立され、1990年4月には日系ブラジル人労働者の第1陣を受け入れ始めた（酒井・湯本 2001）。入管法改定作業において日系人が労働者として注目される背後にはこうした動きがあった。

1990年入管法改正の政策過程

それでは、改定作業の前後ではどのような議論がなされていたのであろうか。そもそも労働省は1967年の第1次雇用対策基本計画の閣議口頭了解以来、「外国人労働者は受け入れない」という立場を守り続けてきた。しかしながら、日本には戦後一方的に国籍を剥奪された在日外国人がすでに定住していただけでなく、外国人労働者を導入する動きが見られた。たとえば1960年代後半から1970年代初頭には、東南アジア諸国の女性労働力が「研修」という名目のもと下請け零細企業に導入され、「准看護婦研修」という名目のもと看護婦も導入されていた。1972年には「国際技能開発計画」が開始され一定枠内で研修生を受け入れ始めた。1980年代諸島には「じゃぱゆきさん」と呼ばれる女性労働者が増加した。1983年の中曽根首相の「留学生10万人計画」は留学生や就学生を急増させ、彼らはアルバイトとして時間制限付きで非熟練労働に従事していた。また専門技術職への就職には「在留資格4-1-16-3」（法務大臣が特に在留を認めるもの）が適用されており、事実上外国人労働者は熟練か非熟練かを問わずに導入されていた。

年	月日	アクター	事項	内容
1967	3/14		第一次雇用対策基本計画閣議決定	外国人労働者の入国認めない
1972			「国際技能開発計画」開始	
1982	1/1		「出入国管理及び難民認定法」施行	「日本人の配偶者と子」新設
1983			「留学生10万人計画」	
1984			三協工業による日系人就労斡旋開始	
1985			国籍法改正 プラザ合意（五カ国蔵相会議） 内需拡大路線	父母両系血統主義へ円高が急激に進行 人手不足減少が生じる
		法務省	日韓法的地位協定にかんする日韓当局者接触開始	
1986	12月	法務省	「外国人労働者雇用者事業法案（仮称）」の検討に入る	
			外国人労働者に関するプロジェクト・チームの提言	
1987	2月	法務省		
	6月	法務省	財団法人入管協会設立	
	11月	法務省	「外国人の就労に関する意識調査」実施	

1988	12月	外務省 労働省	外務省領事移住部に外国人課を新設 「外国人労働者問題研究会」発足	外国人就労問題に着手 雇用許可制度創設案 坂中英徳作成 専門職外国人の受入 拡大 受入肯定過半数
	1月	法務省	入管協会に「外国人労働者問題検討委員会」発足	
	2月	総理府	「外国人の入国と在留に関する世論調査」実施	
	3月	法務省 労働省	入管法改定着手方針発表 「外国人労働者問題研究会」報告書	
	4月	法務省	入管法第一次骨子案公表	
	5月	法務省	入管法改正要項発表 入管協会「検討委員会」報告書 「外国人労働者問題に関する調査検討のための懇談会」発足	
		労働省 内閣官房	「外国人労働者問題菅家省庁連絡会議」設置	
	6月		第六次雇用対策基本計画閣議決定	
	7月	総理府	「外国人の入国と在留に関する世論調査」報告	
	10/16	労働省	労働基準監督署の臨検監督で外国人労働者の調査 「外国人労働者問題関係省庁連絡会議」中間とりまとめ発表	
	11月	内閣官房 労働省 法務省	「外国人労働者問題に関する調査検討のための懇談会」報告書 入管法改定案まとめる 査証相互免除協定一時停止（パキスタン、ベンゴラデシュ）	
1989	1/15	公明党，社会 党	「単純労働者」受入賛成表明	
	1月	下本サンパ ウロ州議員	来日	
	2月	法務省	入管法改定基本方針を発表	
	3月		法案が閣議通過，政府案として国会に提出される	
	3/28	海外日系人 大会	日系人労働者処遇改善の要望書	
	5月			
	6月		出先公館と入管の業務一部分担	
	9/8	閣議	外国人労働者問題を協議	
	9/12	閣議	ボートピープルについて閣議了解	
	10月	内閣官房	三協工業摘発，逮捕 「関係省庁連絡会議」改定法案早期審議に合意	

11月	法務省 衆議院本会	日系ブラジル人就業の実態調査実施	
11/17	議 参議院本会	入管法改正法案通過	
12/8	議	入管法改正法案可決整理値	
12月		「外国人労働者問題に関する閣僚懇談会」設置 「群馬県東毛地区雇用安定促進協議会」設立	「単純労働」検討継続
2月		ブラジルで日系人連邦下院議員が合法化働きかけ	
4月	法務省	日系ブラジル人就業の実態調査結果発表 「群馬県東毛地区雇用安定促進協議会」第1陣受 入開始	日系人待遇問題なし
5/24	法務省	告示を提出	
6/1		改定入管法、告示施行	

表1：入管法関連事項年表

1985年のプラザ合意の後に円高に急速に傾き、内需拡大路線で中小企業の人手不足が深刻化すると、1986年以降は男性の外国人労働者が増加し、1987年頃から「不法就労」が問題視され始めた。こうした状況の中、法務省と労働省を中心に入管法改定作業の準備が始まり、1986年頃から1990年にかけて大規模な改定作業が行われる。

法務省は1986年12月には2年後の立法化を目指して、雇用者に対する営業停止など罰則を盛り込んだ特別法「外国人労働者雇用者事業法案（仮称）」の検討に入った。1987年2月には外国人労働者に関するプロジェクト・チームが提言をまとめ、在留期間3年の延長なし、家族呼び寄せなしの単身出稼ぎとして「単純労働者」の導入を考えている。6月には外郭団体（財）入管協会を設立、11月には「外国人の就労に関する意識調査」を行い、1988年3月には入管法改定着手方針を発表した。

労働省は1987年12月に「外国人労働者問題研究会」を発足し、1988年3月には報告書を提出した。この報告書において、労働省は「雇用許可制度」創設案を提唱したが、この案は外国人の二重チェックになるという法務省の批判、および在日民族団体や経営者団体の反対を受けた。同じく3月には「外国人の就労実態について」という「不法就労」調査を行い、調査対象事業所の3分の1が「不法労働者」を雇用していることを明らかにした。

法務省は1988年4月に第一次骨子案を、5月に入管法改正要綱案を発表し、在留資格の見直し、入管審査手続きの迅速化、就労証明書の交付、雇用主罰則規定、「単純労働者」受け入れ慎重論といった内容を明らかにした。入管協会は1988年1月に「外国人労働者問題検討委員会」を発足させ、5月に中間報告を出したが、その内容は法務省の方針と同じである。

労働省は1988年5月に「外国人労働者問題に関する調査検討のための懇親会（調査会）」を新たに発足させた。6月には第6次雇用対策基本計画（閣議決定）において、「専門技術的な分野や外国人ならではの分野での外国人労働者」を認め、「単純労働の外国人労働者は受け入れない」と従来の基本計画を一部訂正し、専門技術者の受け入れ姿勢を示した。10月には全国の事業所を

臨検監督する際に、同時に「不法就労」の調査を行った。12月には懇談会が報告書を出す、「単純労働者」の受け入れ反対、専門技術者の受け入れ、研修生受け入れといった内容であり、基本的に3月の報告と同じ内容である。「雇用許可制度」についても再検討を行ったようだが、最終的にこの案は実現しなかった。労働省は法務省に、労働力の需給調節の権限を譲り渡したと見ることができる。

それ以外の省庁や政党も動きを見せいている。外務省は1987年11月に、外務省領事移住部に外国人課を新設して、外国人の就労問題など総合的な検討に着手する方針を固めた。総理府は1988年2月に「外国人の入国と在留に関する世論調査」を実施、7月に報告を出し、過半数の人が「単純労働者」受け入れに肯定的であることを示した。内閣官房は1988年5月に、17省庁からなる「外国人労働者問題関係省庁連絡（調整）会議」を設置して総合的な意見調整を行い、11月には「中間とりまとめ」を出した。自民党も1988年に当政務調査会の中に「外国人労働者問題特別委員会」を設置し、関係課題の検討を行っている。1989年1月には、公明党と社会党が「単純労働者」を含む外国人労働者の導入賛成を表明している。

法務省は1988年12月には入管法改定案をまとめ、1989年3月に基本方針を発表し、出入国管理基本計画の策定といった方向性を示した。3月28日に法案は閣議を経て、同日国会に政府案として提出された。

法案は6月と8月に2回先送りされたが、夏に「偽装難民」が来日したことに勢いを得る。9月8日には外国人労働者問題が閣議で協議され、9月12日にはポートピープルの審査について閣議了解がなされる。1989年10月には17省庁連絡会議が「外国人労働者に関する日本政府の基本方針」を発表し、①専門技術者受け入れ、②単純労働者は慎重に検討、③研修生受け入れ検討という方針を打ち出した。そして入管法成立後の12月に「外国人労働者問題閣僚懇談会」を設置し、「単純労働者」に関して検討を継続することが外務大臣の発案で決められた。こうしてようやく関係省庁が合意に達すると、その後一気に審議が進む。最終的に付帯決議が付いたものの、法案はほぼそのままの形で11月17日に衆議院を通過、12月8日に参議院で可決成立した。

大きな論争を巻き起こして成立した改定入管法であるが、「不法就労」対策の罰則規定以外、外国人の就労システムは改定前後を通じて基本的には変わっていない（百瀬・小倉 1992）。変わったと言えるのは、入管法に関連する告示という部分である。

既に述べたように、この改定入管法は、非熟練労働者の導入を認めないという日本の移民政策を決定づけると同時に、代替措置として日系人労働者の導入を認める方針を示すものであるとされている。しかしながら厳密に言えば、1989年12月8日に可決成立した改定入管法には「日系人」という用語もそれを指す内容も一切登場しない。日系人を指す内容は、後に発令される告示において示されている。その告示とは「出入国管理及び難民認定法第七条第一項第二号の規定にもとづき同法別表第二の定住者の項の下欄に掲げる地位に定める件」（平成二年五月二十四日法務省告示第百三十二号）である。

告示とは、政令、症例などと同様に、法律自体で規定できない細部的・技術的事項を行政が定める行政立法の一種で、行政機関がその意思や事実を広く一般に告示する方式である。（原田 1994）。この告示は改定入管法成立の約半年後に当たる1990年5月24日に出され、約1週間後の6月1日に改定入管法と同時に施行されており、これが日系人優先受け入れの根拠となってい

る。

続いて、この告示が何を目的にして作られたか、という点に注目していきたい。そもそも「定住者」という滞在資格は、インドシナ難民、中国帰国者およびその家族の法的地位を明確化する目的で創設されたと言われている。南米日系人の法的地位の整備は、当初予定されていなかったようである。

しかしながら自由民主党発行『月刊自由民主』1989年11月号に掲載された、野島年彦の「進めたい日系人の特別受け入れ」には、日系人が人手不足対策の労働力として注目された理由が、はっきりと示されている。南米日系人労働者の導入を訴えていたのは、自民党の「外国人労働者問題特別委員会」の委員長である加藤武徳参議院議員であった。加藤は「一世は日本国籍を持っていて、二世も単純労働でも何でも働いていい資格があるのですが、一世、二世は四十代、五十代と年配の人が多い。わたしはできれば十代、二十代の日系三世の人たちに来てもらって、働きながら進んだ技術を取得してもらいたいと思っているのですが、三世は現地の国籍だけをとって日本国籍を放棄している人がほとんどなんだそうです。そうすると日系人と言っても入管法上、他の外国人と同じ扱いにしかできない。つまり仕事や活動面でいろいろ制約されて単純労働にもつけない。私は、日本国籍を持っていない三世の方々を何らかの方法で特別扱いにし、一世、二世と同じ資格を与えてやれないものかと、いろいろ検討したんです。できれば今度の入管法改正案に盛り込めないかと動いてみたんですが、結局思うようにならなかった。今も心残りになったおり、なんとかならないかと考えているんだがねえ」と述べている。それを受けて野島は「確かに日系人の就労者を積極的に受け入れようという案は、当面の人手不足の解消に効果的で、しかもすぐ取りかかれる。労働開国反対論の大きな理由は、文化、風習の違うアジア人を大量に受け入れると人種差別など摩擦が起りやすく、単一民族国家に近い日本の民族構成が崩れてしまうというものだ。しかし、同じ日系人なら日本語を十分に話せない人がいても、それほど気になるまい。(中略)外国人労働者の受け入れに反対する人も、日本の風習を身につけた日系人なら特別扱いにそれほど文句はないだろう」(野島 1989)とまとめている。

一度はたち消えとなった南米日系人労働者導入案は、改定入管法成立後の告示の制定作業において現実化する。国会会議録等の資料を時系列で並べると、入管法改定後の半年間に日系人優先受入政策が具体化されたことがわかる。

1989年10月25日の参議院予算委員会では、谷川寛三議員が三協工業の事件にふれ、初めて南米日系人労働者に言及した。

11月19日の参議院外務委員会では、中西珠子議員が同じく三協協業の事件に関して質問し、労働省の吉免氏はブラジル日系人に関して、「外国人とはやはり全く違うわけでございまして、もとをたたせば日本人という面がございまして」と答弁している。さらに「日本国内での就労のあり方のようなものについて検討を進めたいというふうに考えてございまして、実は外務省さんの方にもブラジル国内の事情等の調査もお願いをしております、そういったものを踏まえて適正化でいろんな形の方策はとっていききたいというふうに考えております」とブラジル日系人の就労を認める方向で検討中であることを明らかにしている。

11月30日の衆議院沖縄及び北方問題に関する特別委員会では、宮里議員が南米日系人の入国手続について質問し、「二世、三世というのは、もともと肉体も魂も日本人と同様」であり「日

系人の子弟が日本へ入城してくる場合に、ただ不法就労が目的で入ってくるだろうというような形で入り口を閉めるのではなくて、(中略)これを暖かく迎え入れるということも、この際大事であろうと思います」と述べている。それに対して法務省の堀口氏は「日系人の就労状況に関する実態の把握をさらに進めますとともに、関係省庁とも協議しながら、今後の対応に遺漏なきを帰してまいりたい」と答えている。また外務省の島内氏も「(親族訪問とは違う)他の目的によりわが国に渡航することを希望する日系の方の取り扱いを含めまして、目下法務省と協議しているところ」と述べている。

12月5日には、中南米国会議員連盟と在中南米18カ国の大使との懇談会に置いて、外務省の坂本中南米局長は「長時間議論いたしました。結論から申しますと、日系人については、技術研修、将来の日本と中南米の架け橋になりうる日系人という観点から、もっと健全な受け入れ体制を考えるべきではないかということになりました」と述べたが、おおっぴらに日系人を優遇することは、非日系人との関係上難しい問題があり、工夫を要すると語ったという(藤崎 1991)

1990年2月9日には、外務大臣官房の久米領事部長がサンパウロを訪れ、日系人の就労問題について日本政府の見解を初めて明らかにしているが、旧入管法の内容を再確認しただけであり、日系人労働者の受け入れ問題については本間副領事が「6月に施工される新しい法律を待たなければならぬ」と付け加えた(藤崎 1991)。

4月13日、法務省入国管理局は『在留日系ブラジル人等の稼働状況に関する実態調査の実施について』という調査結果(法務省入国管理局 1990)を発表し、日系人は待遇の面で日本人従業員とほぼ同等の取り扱いを受けており、特に問題がないという結論を導き出した(藤崎 1991)。

4月17日の参議院外務委員会では、猪木寛至議員がブラジルにおいて日系人当事者から就労状況改善の陳情を受けたと発言している。

そして告示の出される3日前である5月21日、参議院予算委員会において中曽根弘文議員から日系二世、三世の就労について「日本の国内では合法なのだと思いますが」と質問が出されている。塚原労働大臣は「無論一世は問題無いですし、二世も問題無いです」と述べた後に、「入管法のあれで今度は三世ももしかしたらよくなるかもしれないですけども」と日系人労働者の優先受入を認め、「労働省といたしましては、今後とも日系人の就労希望者の増加が予想されますので」と日系人労働者の急増を予測している。また法務省の股野氏は日系二世、三世について「新たに定住者という在留資格を与えることにいたしまして」と述べ、「就労を含めてわが国での活動に入管法上の制限を設けない」と明らかにしている。さらに中曽根議員は「一つの地域の商工会とかそういうような団体がまとまって南米から日系人を受け入れようという動きがあるようだが」と付け加えている。

6月1日、改定入管法と関連する行政立法が施行され、上記の告示も施行される。サンパウロ領事館では、日系人の優先受入政策について公式発表がなされた(藤崎 1991)。また、入管協会は『国際人流』1990年7月号で「日系人のUターン現象を追う」という特集記事を組み、早速広報に努めている。ただし特集記事の中では、日系人の在留資格の整備は認めても、日系人を労働者として優先受け入れしたわけではないとしている点に留意しておく必要がある。外務省担当者は「日系人の方が親族と一定期間暮らせばお金がかかるわけですが、その費用を得るために働くことを認めましょうということであって、日系人の就労を促進したりするものではありません」

と説明し、労働省担当者は「日系人のみにターゲットをしぼって労働者の募集を行うことは、民族的出自による差別であり、ブラジル等において人種差別を行うものであるといった批判、非難を生みかねない」と語っている。日系人労働者の優先受入を認めることによって、現地社会において日本政府が人種差別で批判されること、および日系人労働者が急増した後の影響を考慮しての発言と思われる。

入管法改定後、滞日南米人口はさらに増加する。梶田らのグループが1998年12月から1999年4月にかけて行った、入管法改訂作業に携わった法務省担当者らへの聞き取りによると、この日系人優先受入政策は里帰りを想定したものであり、日系人労働者の急増は政策担当者にとって「意図せざる結果」であったと語った（梶田 1998）。

入管法の1990年改正のアジェンダ・セッティングの因果関係分析

入管法の1990年改正によって、日系人が増えていることは確かである。しかしながら、1990年に入管法が改正されたのは日系人の入国管理を簡易化することが本来の目的ではない。当時、国内において問題となっていた不法就労の外国人労働者を排除することが目的であった。つまり、単純労働者は原則として受け入れないという従来からの方針に変化はなかった。従って、入管法の1990年改正では、法務省が高度人材を受け入れるが単純労働者は慎重に対応するとの方針のもとで、財界が求めた労働力の確保とブラジルが求めた日系人の受け入れ緩和という要求を達成するような政策を立案し、実施している

定住外国人との共生

定住外国人との共生の概要

わが国では1988年の「第6次雇用対策基本計画」において外国人労働者を「単純労働者」と「専門的・技術的労働者」とに分けることで、いわゆる単純労働者に関しては慎重に対応し、一方で専門的・技術的労働者に関しては受け入れるという方針が提示された。それ以降、単純労働者としての移民受入ならびに外国人との共生については表立って議論されてこなかった。

しかし、わが国における外国人の状況はこの方針とは異なっている。2014年現在、法務省の在留外国人統計によればわが国の外国人登録者数は235万9,461人となっており、わが国の総人口の1.85%をしめている。また、やや古いが2010年の国勢調査によると、15歳以上の外国人のうち労働力人口は82万9千人となっている。また外国人就業者数は75万9千人である。この産業別構成は、製造業33.6%が突出して多く、職業別構成は生産工程従事者が32.4%、サービス職業従事者が12.2%、専門的・技術的職業従事者が12.2%となっている。特に、90年入管法改正によって急激に増加したブラジル人については、生産工程従事者は64.5%を占めるこのように、わが国においては基本的には受け入れないとの方針であったが、製造業等における外国人労働者は数多く存在し、近年、外国人労働者の受け入れ範囲の拡大を、この分野において求める意見が経済界を中心に出ている（渡邊 2008）。

そして、2014年に入り、外国人労働者の受入に関する議論が各所で巻き起こっている。政府は、1月20日、「成長戦略進化のための今後の検討方針」を産業競争力会議においてまとめ、わが国を内側からグローバル化する手段として、「外国人材受入のための司令塔の設置」をするとして

いる。さらに、「持続可能な経済成長を達成していくために必要な外国人材活用の在り方について、必要分野・人数等も見据えながら、国民的議論を進める」方針を提示している。また、1月24日の建設分野における外国人材の活用に係る閣僚会議では、建設技能労働者が不足している現状に関して、オリンピック・パラリンピック関連施設整備対応ならびに震災復興事業のための方針について、年度内を目処に結論を出すこと示された（産業競争力会議 2014）。

さらに、2月13日、安部首相は衆議院予算委員会において、「専門的・技術的分野の外国人は、経済社会の活性化に資するという観点から積極的に受入れ、技能実習制度については、技術移転による国際貢献がさらに促進されるよう制度の充実を検討する」と述べ、外国人と共生することについて、「我が国の将来の形や国民生活全体に関する課題として、国民的な議論を経た上で多様な角度から検討する必要がある」と前向きな発言をしている。また、2月24日に内閣府が「選択する未来」委員会の第三回会議資料として「目指すべき日本の未来の姿について」という移民受け入れを念頭においた人口動態予測を初めて発表した（内閣府 2014）。

定住外国人との共生の背景

先に述べたように1988年の「第6次雇用対策基本計画」において、単純労働者の受入を事実上否定してから、その方針が今日まで引き継がれている。当時の議論は、外国人にわが国の門戸を開くか、従来通りのままにするかという選択であったが、それからほぼ10年後に小渕内閣に経済企画庁長官として迎えられた堺屋太一は人口減少社会への対策として、外国人移民の受入を積極的に考慮することを提案している（駒井 2002）。この堺屋の諮問を受けて、経済審議会は1999年7月に「経済社会のあるべき姿と経済新生の政策方針」を答申し、専門的・技術的分野の外国人受入の積極化と、留学生の受入拡大や卒業後の就職支援などの促進を謳ったが、いわゆる単純労働者については十分に対応するとして、従来の姿勢にとどめている。また、同年8月、雇用審議会による「第9次雇用対策基本計画について -今後の労働市場・働き方の展望と対策の方向」が閣議決定された。そこでは、少子・高齢化に伴う労働力不足は、外国人労働者ではなく、国内の女性労働力と高齢者労働力で代替するとされている。

しかしこれは表面上のことであり、実際としては前章の90年入管法改正によって日系人労働者が増加している。特にブラジル人については、1986年には2,135人と微々たる数であったが、施行された1990年には56,429と大きく伸びている。バブル崩壊後も2007年までは一貫して右肩上がりの趨勢を示し、316,967人まで増えている。

このように、外国人労働者、特に日系ブラジル人の就労が増加した要因として、当時のブラジル経済の停滞がある。イシ（2006）によれば、わが国の日系ブラジル人出稼ぎ論が、日本とブラジルの二国間関係で説明されがちな点を指摘した上で、「ブラジルから日本への出稼ぎがブーム化した1980年代後半は、既に大勢のブラジル人が複数の欧米先進諸国に向かっていった時期」であると述べている。ブラジル経済は1960年代末から1970年代前半にかけて、GDP成長率が年平均10%を超えていた。しかし第二次石油ショックと対外債務危機から始まった1980年代は、一般に「失われた10年」と呼ばれ、81年と83年にはGDPがマイナス成長を記録している。

この経済の停滞は雇用に影響を及ぼすとともに、80年代末には年率1000%をこすハイパー・インフレーションが襲った。そのような状況に際して、ブラジル人の一部は海外脱出を始めた。

イタリアを足場に欧州に移民するもの、歴史的につながりの深いポルトガルに渡るもの、北米を目指すもの、そして「定住者」という門戸からわが国に訪れるものである。こうして、ブラジルは入移民の国から出移民の国に変貌と遂げたのである。

さらに、1990年前後は、日本の労働市場が労働力を必要としていたことも、外国人労働者が増えた要因である。バブル経済とともに、特に輸出製造業において人員不足となっていた。しかしながら、バブル崩壊以降も外国人労働者が増えていることから、日本の労働市場が外国人労働者を需要していた理由はそれだけではない。

この要因は丹野（1999）の記述から推定できる。丹野（1999）では、業務請負業が日本の産業社会の中でどのように位置づけられ、そこでは日系ブラジル人がどのような働き方をしているのかを、日本人の出稼ぎ・季節工・期間工との関係など、実態調査に基づいて検討している。それによると、企業が請負業を使用しようとしたことが、日系人労働者の増加を招いたのであり、最初から日系人労働者を雇用しようとしたのではないのである。このことは、山田氏もインタビューにおいて主張している。競争関係にある企業が請負業を使用することを理由にして、請負業を自社でも使用するというような企業が増加したのである。その結果として、日系人労働者を雇う企業は増加して、多様化していった。日系人労働者の雇用が拡大することによって日系ブラジル人・日系ペルー人等、日系人それ自体にも多様化と階層性をもたらしているという。

そもそも、技術や技能を有していない労働者が生産現場で雇用されるようになったのは、製品がモジュラー化されているからである（渡辺 2006）。国際競争によって強まるコスト削減圧力に対応する方策の1つとして、企業は雇用の柔軟性を確保するために、製品をモジュラー化してアウトソーシングを進める必要があった。製品がモジュラー化されることによって、高い技術・技能を持たない未熟練労働者や外国人労働者であっても生産現場で雇用できる。仕事になれるまでの期間が数日というものもあり、業務請負会社の日系人労働者が技術・技能を有していなくても製造現場で働くことができるのはこのためである。

このように、製品サイクルが短くなり、製品のモジュラー化が生産技術の熟成により促進させられているために、正社員から請負業への代替が進んでいる。請負業が生産現場の労働力の大部分を担うようになったのは、受け入れ側が雇用の柔軟性を担保することが必要だからである。労働力が比較的単調な作業に従事する単純労働者と問題発見ならびに解決を担っている正社員に二極化しているのは、こうした状況から、製品の生産プロセスがシステム化・複雑化・高度化しているからである。（中馬 2001）。

また非典型化の理由としては、将来の下ブレリスクを考慮して正規従業員の雇用を守ること、労務コストの変動費化や削減も考えられている。（村松 2004）。さらに、自動車産業については特にジャスト・イン・タイムの生産方式をとっていることが労働力を冗長性担保の道具とすることにつながっている。正確な受注量を把握し受注情報を親会社から再末端の下請けに至るまで共有することで、生産活動を同期化させるのがジャスト・イン・タイムである。その結果、閑散期を基準に正社員を用意し、繁忙期との差は非正規雇用で労働力をやりくりすることで、生産活動を需要と同期させても冗長性を担保できるという戦略がうまれた（丹野 2009）。

このように日本国内外の労働市場の影響によって、1990年以降急増し、バブル崩壊後も増加し続けている外国人労働者は逆に、日本の労働市場に対して少なからぬ影響を与えている。それは

外国人労働者外の雇用・就業が、国内労働者の雇用・就業行動と異なる傾向にあるからである。こうした状況は国によっても状況が異なる。たとえば、特定の産業分野に集中する傾向があることや、欧州ではサービス業にも広がりを見せていることが指摘されている（井口 1997）。

こうした外国人の雇用・就業が特定の産業に集中していることは日本においても同様である。特に、日系人労働者の場合は顕著であり、先に述べたようにブラジル人の6割以上は生産工程従事者である。このことは、彼らの居住地を限定することにもつながっている。彼らはブラジルからわが国に地球を半周してやってくるのだが、その経路は国と国とを結ぶのではなく、わが国のある特定の地域と結びついた経路である（丹野 2007）。南米日系人は「保見」という地区名は知っていても「豊田市」という市名は知らず、「湘南台」という地区名は知っていても「藤沢市」という市名は知らないのである。このように、外国人労働者はピンポイントに移住してきて、集住地域を形成している。この集住地域の形成によって、日本人口の2%に満たない外国人労働者が下記に述べるような、日本の労働市場に影響を与えていると推定されうる。

労働者が外国から流入してくることによる影響は、本格的に外国人労働者が流入する1990年以前から検討されている（樋口 1988）。わが国の国内労働者数の減少が、外国人労働者が流入することにより引き起こされることが指摘されている。また、特定の職種や、特定の地域に労働力としての外国人は集積する傾向があるため、そういった職種や地域においては国内労働者の賃金が低下し、進展しつつある国際分業流れが滞る可能性も示唆されている。

前者については、不熟練の外国人労働者と国内の女性パートタイム労働者とが代替的であることを指摘されている。特に女性パートタイム労働者中でも、製造業部門における生産工として働いているものがその傾向が強い（三谷 1993）。三谷によると、不熟練外国人労働者の流入がわが国では1980年代後半に至るまでなかったことが、わが国の技能工・生産工程作業者に占める女性パートタイム労働者の割合の高さを導いている。外国人労働者の流入が始まったことによって、徐々に労働力の属性が移り変わっていると、示唆されている。

また渡辺（2006）は、外国人労働者と若年労働者が代替的である可能性を示唆している。若年労働力が少子高齢化によって減少し、労働力を十分に確保ができていない企業が増加している。これと同時に、若年者は中小企業において特に定着が悪く、より良好な就業機会を求めて転職を行っている。このような状況の中で、外国人労働者を雇用していない企業のうち、その理由として若年労働者を採用できていることを挙げているものもあることから、若年労働者と外国人労働者が代替的であると考えられる。

後者に関しては、大竹・大日（1993）の推計結果によると、外国人労働者数の10%の増加は非正規労働者の賃金を3~5%低下させることなどが示唆されている。これは、パレートの意味で外国人労働者が代替性を資本と非正規労働者についてと有しており、つまり、外国人労働者が担っている仕事は非正規労働者が行っているものに近く、資本によって取って代わることが可能なものであることが理由である。

このことは渡辺（2006）や氏に対するインタビューによって裏付けされている。近年、日本人中心の請負会社と日系人中心の請負会社との競争が激しくなっている。これは、従来のイメージとは異なり、日系人労働者は集住地域だけではなく全国に広がりつつあるようであるからである。集住地域の日系人請負会社が東北地方の企業立ち上げの際に活用されたり、同じく東北地方の大

手電機・電子部品工場で活用されたりしているケースがある。これは、従来日本人請負会社を使っていた企業が日系人請負社員へとシフトし始めたからである。また、請負社員の活用には一次下請けでは日本人請負社員中心、二次下請けでは日本人請負社員と日系人請負社員が半々、三次下請け以下では日系人請負社員という「棲み分け」ができていた。しかし、上の事例はいずれも一次下請けレベルであり、従来の「棲み分け」とは異なる。このような請負会社間の競争によって、日本人と日系人の請負単価の格差が縮小している。その結果、日系人中心の請負会社よりも日本人中心の請負会社の方が、単価が低い事例もある。

また、外国人労働者の増加はさらなる外国人労働者の使用を促進している。先にも述べたように、外国人労働者、特に日系人労働者は輸出産業の生産都市において集住地域を形成している。その結果、その集住地域において外国人労働者が必要不可欠な存在となる。これは、使用者にとって外国人労働者に「麻薬的な意味合いがある」（インタビュー 丹野）ことによる。それは、日本人がやりたがらないような残業や土日の出勤にも文句を言わずに対応すること、安価な労働力であることという、使用者に都合のいい労働力であるからである。そのため一度外国人労働者を使用するとやめられず、さらに数を増やすことが多いと推定される。

これら、外国人労働者増加がわが国の労働市場に与えた影響は、二重労働市場の格差および規模の拡大につながっている。二重労働市場（dual labor market）とは、先進国の労働市場が、正規雇用の基幹労働力から成る一次的労働市場と、非正規雇用の周辺的な労働力から成る二次的労働市場に分断される状況を指す。とりわけ、大量生産システムの下では、安定的需要に対しては社内の基幹的労働力で対応し、季節変動や景気変動による需要の増減に対しては外注化や社外工の臨時雇用で対応するケースが考えられる。

先に見たように外国人労働者は、日本人の非正規労働者と競争関係にある。彼らは製造業における需要の変動の冗長性として雇われ、その仕事は簡易なものが多いため価格が一番の競争力になる。そのため外国人労働者の流入によって、外国人労働者と日本人の非正規労働者との間に価格競争が発生し、非正規労働者の請負単価が下がるため、二重労働市場の格差は拡大する。

さらに、外国人労働者の増加はさらなる外国人労働者の使用を促進している。これは、同一産業内に限った話ではない。丹野（2002）、丹野氏へのインタビュー、氏へのインタビューによると日系人労働者の労働市場は業務請負業という社外工送り出しの制度であり、これを活用する日本企業は増えている。そのため日系人の職場は多様化し、自動車や電子といった輸出産業から、コンビニ向けの弁当工場、農協での切り花の箱詰め、漁協でのあさりやしじみの選別、さらには産業廃棄物処理場へと広がっている。このように、外国人労働者はその職場を多様化させていることは、わが国の二重労働市場の規模拡大につながっている。

外国人労働者の増加のわが国に対する影響は、労働市場に限った話ではなくわが国の外国人行政にも及んでいる。ピンポイントに移住し外国人労働者は集住地域を形成するため、その地域において外国人が占める割合が極端に高くなる。例えば、愛知県名古屋市保見ヶ丘にある保見団地では、2005年には全世帯1907戸に対してブラジル人世帯が占める割合は、約56%に達している（坂中 2005）。1980年代後半から同団地では、南米出身者が数多く暮らしており、ブラジル人の他にもペルー人やボリビア人がいる。そのため、南米人から来た彼らと同団地に住んでいた日本人との間で、文化的な価値観や言語の相違に端を発して、問題が多く発生していた。それにより、

両者の間には深い溝が生じていた。1990年代には日本人住民だけでなく、右翼関係者もとブラジル人と対立関係にあり、1999年には暴動寸前の騒ぎが起きるなど、両者の関係は悪化していた(中日新聞 1999年6月8日付朝刊)。

これらの問題は1990年の入管法改正が、法の運用による就労制限の撤廃をしたのみであり、日系人について入管法上の問題としてしか捉えていなかったことが原因である。入管法を超えて、日本の法社会全体の秩序として、外国人である日系人労働者とその家族をどのように位置づけるかは曖昧にされたままであった。人が家族として居住するようになれば子どもの教育の問題、家族の医療の問題、住宅問題は必ず発生するし、滞在が長期化しデカセギ就労者の高齢化が始まれば年金や介護の問題も生じてくる。失業した際の失業保険の対象や失業者に家族がいれば生活保護の対象にも上ってくる。長期に居住すれば市民としてのニーズが発生するのは当然であったが、これらのニーズに対して権利としてどこまで要求できるのかは極めて曖昧にされたままであった。その結果、日系人が必要とする社会サービスは公的セクターから供給されることはなかった(丹野 2009)。

特に日系ブラジル人子弟の教育問題は2000年頃から問題として取り上げられるようになった。わが国にはブラジル政府が認可しているブラジル人学校が存在するものの、多くの外国人学校と同じようにブラジル人向けのナショナルスクール扱いであり、わが国の学校制度下では、文部科学省からの各種支援を得ることができない「各種学校」扱いとなっている。それだけでなく、わが国の小学校や中学校、高等学校を卒業したという卒業資格を得ることもできない。さらに、ブラジル人学校は公立の学校に比べて学費が高くなっており、学校に子どもを通わせることができない両親もいる(住谷 インタビュー)。その他にも、子どもが学校に通っていないケースとして、ブラジルの学校と教育方針が異なる日本の学校を両親が嫌うこともある。

2000年頃から、こうした学校に通っていない若者の一部が非行にはしることが問題視されるようになった。それにより、自治体レベルではNPOを活用して教育を提供する機会を増やしたり、不就学児童生徒の実態について調査を行い、ブラジル人の教員を採用したりというような教育対策が徐々に進められるようになってきた。

この教育の例でみられるように、外国人労働者が集住している自治体が外国人住民に関する施策を行っている。(外国人集住都市会議 2013)それは、行政・生活情報や防災ネットワークの他言語化、住宅への入居支援といった暮らしやすい地域社会の構築から、社会保険加入促進や雇用安定化のための体制整備といった労働環境の改善など包括的な対応を目指している。この理由は、それら外国人集住都市の産業が外国人労働者なくしては既に成り立たなくなっているからである。

このような定住外国人に対する施策は、さらに日系人を日本に定住させることを念頭に置いている。2014年3月13日の参議院内閣委員会において、浜田和幸議員の世界全体で200万人以上いる日系外国人に定着してもらうための課題認識に関する質問に国務大臣の森まさこ議員は「子どもの教育、就職、地域社会とのコミュニケーションで支障が生ずることなどの課題が指摘されている」とし、その課題に政府は「日本語教室の実施、公立学校における受け入れ体制の整備、日本語コミュニケーション能力の向上等を目的とした就労準備研修、定住外国人の施策ポータルサイトによるポルトガル語、スペイン語等多言語での国の制度の情報提供等を実施してきた」と、

これまでの施策を評価し、さらなる日系人の定住を検討している旨の発言をしている。

このようにわが国の労働市場ならびに外国人施策に影響を与えている 90 年入管法改正による日系外国人の増加は、さらなる移民受入議論を招いている原因と考えられる。一方で、今日のわが国が、少子化が進行するとともに長期間の人口減少期に入っていることも、マクロ的な要因として考えられる。出生率が現状のまま推移するとき 2060 年には約 8,700 万人まで減少すると推定されており（内閣府 2014）、人口を 1 億 1,000 万人程度に維持する場合は移民を年 20 万人ずつ受け入れる必要があると推定されている。

定住外国人との共生に関わる因果関係分析

定住外国人との共生の議論に影響したとされる論点について、上記背景の議論をもとにリストアップし、その上で 90 年入管法改正を中心として各々のイシュー間の因果関係を推定し、図に示すような因果関係を形成した。

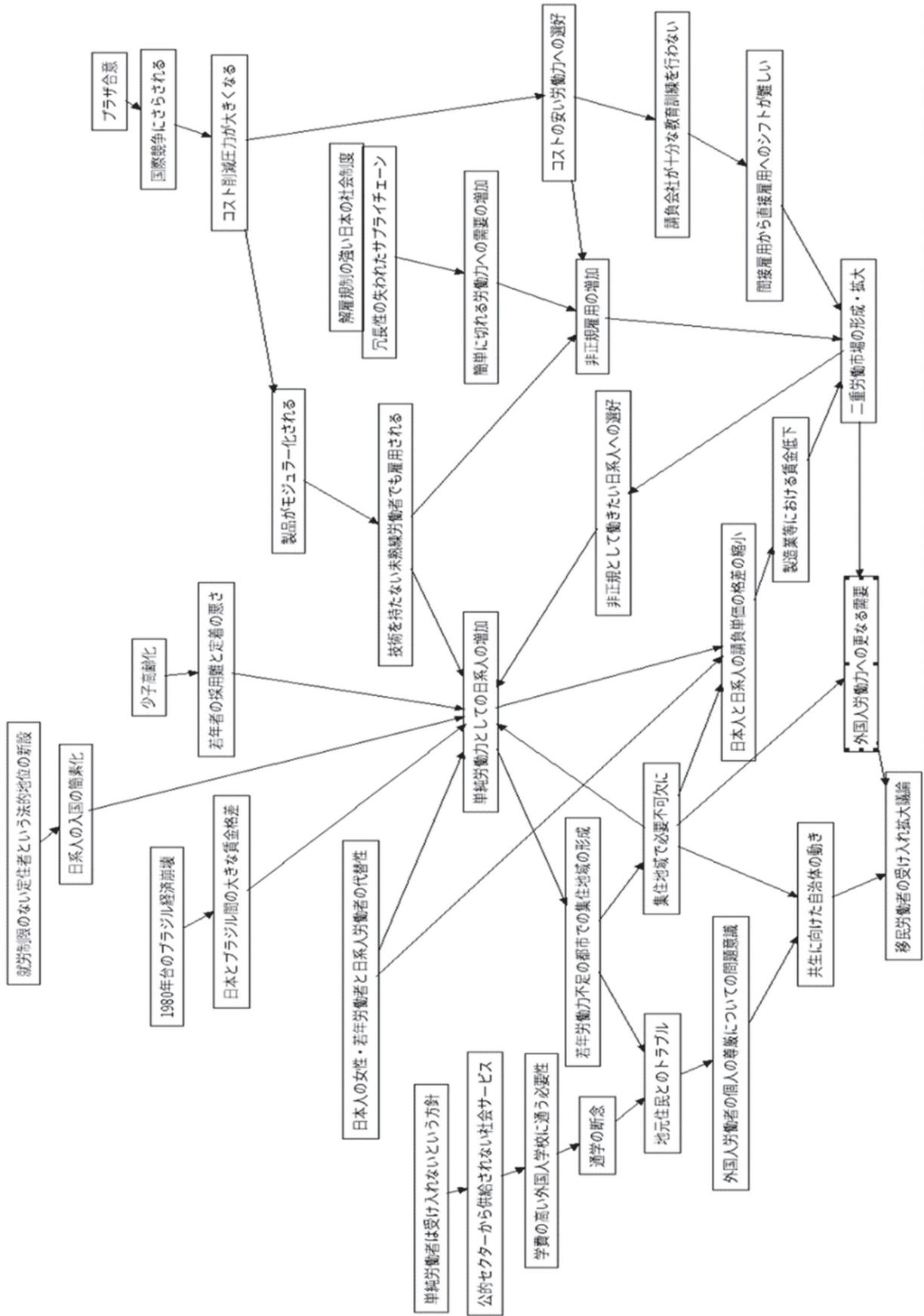


図 8 : 定住外国人との共生のアジェンダ・セッティングの因果関係分析図

1.3. アジェンダ・セッティングの類型化

分類軸は、縦軸として政策目標のパラダイムシフトが政府内において起きているか否かを、横軸としてアジェンダ・セッティングを行った主たるアクターが政治アクターであるのか、政策専門家であるのかを採用した。政策目標は、その政策目標を理念的に枠づけている思考モデルそのものが転換することによってパラダイムシフトが起こる (Hall 1993)。この政策パラダイムシフトは単に政策目標に関する変化ばかりではなく、政策手法、国家の役割、市場のルールまでも転換しうるものである。一方で、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターとは、アジェンダ・セッティングを行うことによって政策転換を試み、実際に行った人物のことを指している。その人物が、首相、大臣、高名な議員、メディア等の政治的な影響力を発揮することができる場合に政治アクターと判断し、官僚、シンクタンク、研究者等の政策立案に影響力を発揮することが出来る場合に政策アクターと判断した。

前章で記述したアジェンダ・セッティング事例の分析をもとに、それぞれの事例を分類していく。

医師不足

縦軸である政策目標のパラダイムシフトが政府内において起きているか否かを判別する。医師不足が言及されるようになったのは、2007年2月の日本医師会による「医療提供体制の国際比較」が発表されてからである。この中で「日医は偏在が医師不足の主たる原因であると言ってきたが、それに加え、絶対数も十分ではないことがわかった」として、それまでの方針を転換している。つまり、長らく医師過剰を報告し医師不足ではないと捉えられていた医療提供体制に対する見方が転換し、医師数が不足していることを認めている。それに伴い医師養成数増加に向けた取組が行われていることは、政策手法の変化を示している。以上から、医師過剰の報告から一転して医師不足に変わったことは政策目標のパラダイムシフトが起きていると判断することができる。

横軸であるアジェンダ・セッティングを行った主たるアクターを特定する。医師不足のアジェンダ・セッティングの因果関係分析によれば、医師不足・偏在は医師の絶対数の不足や、社会保障費の圧縮政策、地方自治体の財政悪化等によって地域医療に対して過度に負担がかかっていたところ、新医師臨床研修制度と医局崩壊というトリガーによって認識されるレベルまで増大したと推定されている。小松崎 (2012) による新医師臨床研修制度を立案した政策専門家へのインタビューによると「医局解体の意図を持っていたこと」や「新制度は従来傾向に拍車をかける」ことが示唆されている。このことから新医師臨床研修制度の政策立案者は、新制度により医師不足が顕在化するであろうことを予測しながら、医師不足というアジェンダをセットするために、新制度を設計したと推定される。従って、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターは新医師臨床制度を立案した政策専門家であると判断する。

郵政民営化

縦軸である政策目標のパラダイムシフトが政府内において起きているか否かを判別し、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターを特定する。政民営化が初めて論じられたのは1981

年に発足した第二臨調によってであるが、2005年9月の総選挙以外では国民は重要視していなかった。それは、本来の郵政民営化の目的が、国民にとって理解し支持することを受け入れがたいハード・イシューだったからである。しかし問題の重要性を理解し郵政民営化を成し遂げようとした小泉は、問題の重要性と世論の無理解とのギャップを埋めるために、4つの議論を展開した。いずれの主張も、郵政民営化の目的を国民にとって理解しやすいイージー・イシューへと転換するものであった。国民の支持を得て小泉は2005年9月の総選挙を大勝した。その後の国会における郵政民営化法案の採決では、選挙前後で構成員が変わっていない参議院において反対多数から賛成多数へと変わり、可決された。つまり、郵政民営化の政策目標がパラダイムシフトによって、支持されやすい政策目標へと転換したのである。したがって、郵政民営化のアジェンダ・セッティングにおいては政策目標のパラダイムシフトが起きていると判断することができる。また、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターは小泉首相であり、政治アクターであると判断する。

ゆとり教育

縦軸である政策目標のパラダイムシフトが起きているか否かを判別し、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターを特定する。1989年の学習指導要領改訂の土台となった臨時教育審議会に影響を受けた文部省は、自ら新しい政策を求める組織に変革し、1998年学習指導要領改訂の際には、1970年代から提唱し続けてきた「ゆとり」という概念と、新しく「生きる力」という概念を組み合わせることによって、アジェンダ・セッティングを行っている。このアジェンダ・セッティングによって教育行政に関わる各アクターの要求を達成しながら、自ら主導して大胆な教育改革を断行した。つまり、「ゆとり」というアジェンダは1970年代から提唱されていたもので、それを政治的な取引により1998年に全面に押し出している。その「ゆとり」というアジェンダは、学校の荒廃に対処することを目的としており、その目的は1970年代から一貫している。従って、政策目標のパラダイムシフトは起きているとは言えない。また、アジェンダ・セッティングを行ったのは、自らが提唱した「ゆとり」という概念に各アクターの要望を盛り込んだ文部省であり、政策専門家である。

アベノミクスの第一の矢である異次元の金融緩和

縦軸である政策目標のパラダイムシフトが起きているか否かを判別する。解決すべき問題として円高・デフレ不況に注目が集まったのは、日本産業構造が輸出に依存していることや、バブル崩壊後のデフインフレ経済からの脱却を図ることができずデフレが脅威になったことである。バブル崩壊後に徐々にデフレの脅威が問題として取り上げられるようになり、金融緩和政策を求める声があがっていた。それに応じて小規模な金融緩和政策をとることもあったが、依然として政府は追加の金融緩和政策を要求していた。この長期的なトレンドに合わせて、FRBとECBが金融緩和政策を行ったことによる戦後最大の円高による更なるデフレへの危機感と、日本銀行に強硬な態度をとる安倍政権の誕生によって、異次元の金融緩和政策のアジェンダがセットされた。以上から、異次元の金融緩和政策は以前から存在した金融緩和という政策目標と変わらず、政府内において政策パラダイムシフトは起きている判断できる。

また、横軸であるアジェンダ・セッティングを行った主たるアクターは安倍首相である。安倍は2012年11月に衆議院が解散されて以降は連日のように大胆な金融緩和策を行うことを宣言していた。その総選挙において勝利したことにより、日本銀行に前例のない金融緩和政策を要求することが可能になっている。したがって、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターは政治アクターであると判断する。

ドイツのシュレーダー政権下における脱原発の決定

縦軸である政策目標のパラダイムシフトが起きているか否かを判別する。ドイツ国内における原子力発電所に関わる問題は、原子力発電に関わるコストの増大によって電力会社の原子力発電への選好が弱まっていったことで、脱原発へとアジェンダが徐々に絞られていったと考えられる。原子力発電所の新規建設はなくなり、放射性廃棄物の処理方法も直接処理が選択肢に加わったことで議論が終わった。従って、残る議論が原子力発電所の稼働年数のみとなった。もちろん、直接的なアジェンダ・セッティングの要因は1998年に脱原発を掲げるSPDと緑の党との赤緑連立州政府が誕生したことだが、16年続いたコール政権への飽きもあり、国民から積極的に支持されたとは言いがたい。また、脱原発に関して全党コンセンサスが得られたわけでもない。以上から、政策目標のパラダイムシフトは起きていないと判断する。

横軸であるアジェンダ・セッティングを行った主たるアクターを特定する。先にも述べたように直接的なアジェンダ・セッティングの要因は脱原発を掲げるSPDと緑の党の赤緑連立州政府が誕生したことである。従って、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターは政治アクターであると判断する。

ドイツのメルケル政権下における脱原発の再決定

縦軸である政策目標のパラダイムシフトが起きているか否かを判別する。日本という高度技術国で原発事故が起こったことから原発事故が現実になりうるものとしてリスク認識が変わっている。さらに、メルケルは一度撤回した脱原発路線に立ち直る新たな根拠として倫理の観点を持ちだしている。「安全なエネルギー供給のための倫理委員会」は「原子力発電所は、倫理的理由からリスクの少ないエネルギー供給により置き換えられるべき」であると、倫理的観点という全く新しい思考モデルから政策転換を主張している。これにより、原子力発電推進派の与党であるCDS/CDU、FDPと原子力発電反対派の野党であるSPD、緑の党の全党コンセンサスによってシュレーダー政権による「脱原発の政治的決定」に立ち戻っている。以上から、ドイツのメルケル政権下における脱原発の再決定は政府内において政策目標のパラダイムシフトが起きていると判断することができる。

横軸であるアジェンダ・セッティングを行った主たるアクターを特定する。政策目標のパラダイムシフトを起こした新たな根拠である倫理の観点は、メルケル首相が「安全で確実なエネルギー供給のための倫理委員会」を設置することによって持ちだされている。従って、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターはメルケル首相であり、政治アクターだと判断する。

入管法の 1990 年改正

縦軸である政策目標のパラダイムシフトが起きているか否かを判別する。入管法の 1990 年改正によって、日系人が増えていることは確かである。しかしながら、1990 年に入管法が改正されたのは日系人の入国管理を簡易化することが本来の目的ではない。当時、国内において問題となっていた不法就労の外国人労働者を排除することが目的であった。つまり、単純労働者は原則として受け入れないという従来からの方針に変化はなかった。外国人の就労システムは改定前後を通じて基本的に変化はなく、日系人の入国の簡易化も法改正の結果ではなく、法の行政による運用上の判断によって行われている。以上から、入管法の 1990 年の改正において政策目標のパラダイムシフトは起きていないと判断する。

横軸であるアジェンダ・セッティングを行った主たるアクターを特定する。1987 年頃に不法就労が問題となってから、法務省は外郭団体である財団法人入管協会を設立して、「外国人の就労に関する意識調査」を行っている。外国人の不法就労が問題になっていたとはいえ、当時のわが国の外国人問題といえば、在日朝鮮人の指紋押捺拒否についてであり、入管法の改正に関わる議論が表でなされていなく、省庁間の意見調整によって改正の方針が策定されている。従って、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターは法務省内の政策専門家であると判断する。

定住外国人との共生

縦軸である政策目標のパラダイムシフトが起きているか否かを判別する。日本に定住している日系外国人の人数は 1990 年の入管法から 10 年経たないうちに 10 倍以上になっている。彼らは輸出産業の生産都市において集住地域を形成し、保見団地等では世帯数の 50%をしめるため、その地域の産業において必要不可欠な存在になっている。しかしながら、外国人の単純労働者を受け入れないという方針のため、彼らのための社会サービスが公的セクターから供給されていない状況が続いた。そのことが 2000 年頃から問題として取り上げられるようになり、2010 年に「日系定住外国人施策に関する基本方針」を策定し、各種の施策を推進している。外国人の単純労働者を受け入れないという方針から、そもそも社会サービスが必要であると認識がなかった状況から一変して、彼らに定着してもらうための課題認識が生じている。以上から、定住外国人の共生についてパラダイムシフトが起きていると判断することができる。

横軸であるアジェンダ・セッティングを行った主たるアクターを特定する。先に述べたように、日本に定住している日系外国人は集住地域を形成し、その地域で必要不可欠な存在になっているからこそ、共生への道が模索されている。このように日系人が流入するきっかけとなったのは 1990 年の入管法改正である。この入管法を改正した人物へのインタビュー調査から入管法改正によって、日系ブラジル人が 30 万人程度まで流入することと、移住してきた地域において受け入れられるだろうことを想定して、この入管法の改正を策定している。従って、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターは入管法の 1990 年改正案を立案した政策専門家であると判断する。

以上の分析から、アジェンダ・セッティング事例の分類図は図 9 のようになる。

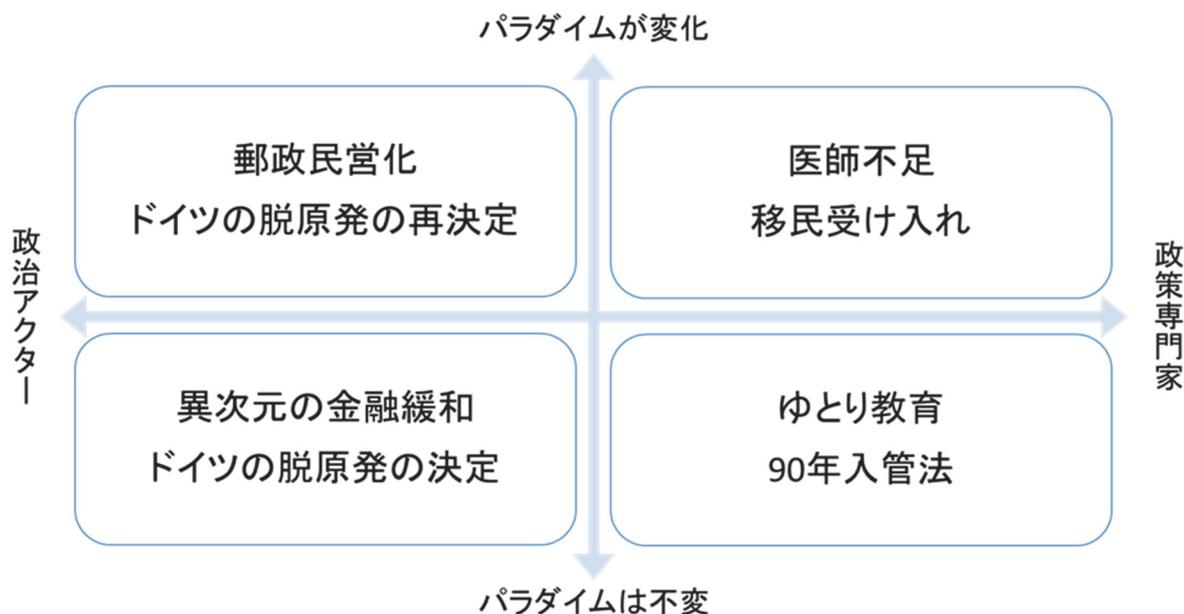


図 9：アジェンダ・セッティングの類型化と事例の分類

各項目の特徴

政策目標のパラダイムシフトが政府内において起きているか否かと、アジェンダ・セッティングを行った主たるアクターが政治アクターであるのか政策専門家であるのか、によって分類された各項目のアジェンダ・セッティング事例を比較し、共通点から各項目の特徴をまとめる。

・パラダイム変化－政治アクター

郵政民営化とドイツの脱原発の再決定の共通点は、首相がリーダーシップを発揮しフレーミングによってパラダイム変化を起こしている点である。郵政民営化においては小泉首相がリーダーシップを発揮し、郵政民営化を国民にとって理解しやすいイージー・イシューへと転換するフレーミングを行い、パラダイム変化を起こしている。また、ドイツの脱原発の再決定においてはメルケル首相がリーダーシップを発揮し、全く新しい倫理的な観点から原子力発電に関わるリスクを評価するフレーミングを行い、パラダイム変化を起こしている。このことから、政治アクターがパラダイム変化を起こすようなアジェンダ・セッティングを試みる際はフレーミングが有効であることがわかる。また、小泉とメルケルとの共通点としては、両者とも以前に該当領域を担当していたことがあげられる。小泉は郵政相を、メルケルはエネルギー・コンセンサス会議の議長を務めていた。

また、この項目は政策転換のパラダイムシフトが起こっているので、Hall (1993) の政策転換パターンのうち第 3 のパターンである。

・パラダイム変化－政策専門家

定住外国人との共生と医師不足の共通点は、政策専門家が潜在的な問題が存在することを認めた上で、それが顕在化するような政策を立案し実行することによって、その問題を広く認識させ

ることでアジェンダ・セッティングを行っていることである。定住外国人との共生においては、外国人が定住するにあたって十分な社会サービスを公的セクターから受けられないという潜在的な問題があった。入管法の 1990 年改正によって日系人が特定地域で急増することになるが、先の潜在的な問題から地域住民とのトラブルが発生し、問題が顕在化した。一方で医師不足においては、医師の負担増による医師不足が潜在的な問題であった。新医師臨床研修制度をトリガーにして、医局の崩壊、医師の引き上げ、医師のさらなる負担増が起こり、医師不足の問題が顕在化した。このことから、政策専門家は専門とする政策領域に存在する潜在的な問題のアジェンダ・セッティングを、政策の立案、実行を通して行いうることが推察される。

また、この項目は政策目標のパラダイムシフトが起こっているので、Hall (1993) の政策転換パターンのうち第 3 のパターンである。

・パラダイム不変－政治アクター

異次元の金融緩和とドイツの脱原発の決定の共通点は、国政選挙による政権交代で政治の流れを高めた後に、利害対立関係者との利益交換によって政策が決定されている。異次元の金融緩和においては、解散総選挙の際に安倍は金融緩和政策を行うことを宣言し勝利している。その後、日本銀行の独立性との交換で、日本銀行に金融緩和政策を行うことを要求している。また、ドイツの脱原発の決定においては、SDP と緑の党は以前から脱原発を掲げていた。選挙に勝ち、赤緑連立連邦政府が誕生した後に、電力会社との交渉において稼働年数を譲歩することによって、脱原発を決定している。両者とも、以前から問題は認識されており、求められていた政策であった。それが、政権交代によって問題・政治の流れが合流し、利益交換を通して政策の合意がなされている。

この項目は、政策目標のパラダイムシフトは起こっていないが、政策手段が発展しているため Hall (1993) の政策転換パターンのうち第 2 のパターンである。

・パラダイム不変－政策専門家

ゆとり教育と入管法の 1990 年改正との共通点は、政策専門家が自らの目的に財界や政治家というような外部からの要求を包含させることによって、政策のアジェンダ・セッティングがなされている。ゆとり教育においては、文部省が「ゆとり」と「生きる力」という概念のもとで、リベラル層の求める学習内容の削減や与党自民党が求める教育にかかる経費の削減、財界が求めるエリート育成環境の整備等の要求を達成するような政策を立案し、アクター間の対立を起こすことなく実施に至っている。また、入管法の 1990 年改正では、法務省が高度人材を受け入れるが単純労働者は慎重に対応するとの方針のもとで、財界が求めた労働力の確保とブラジルが求めた日系人の受け入れ緩和という要求を達成するような政策を立案し、実施している。両者とも、政策専門家が自らの方針を守りつつ、政策代替案の検討により関係アクターが望むような政策を實現している。

この項目は、政策目標のパラダイムシフトは起こっておらず、政策手段が発展しているものとしていないものがあるため、Hall (1993) の政策転換パターンのうち、第 1 のパターンもしくは第 2 のパターンである。

各項目の特徴を踏まえた上で、この分類を Hall (1993) の政策転換モデルと比較を行う。各項目の特徴の記述において述べたように、それぞれの項目は Hall (1993) の分類と対応関係にある。それを図示したものが図 3-2 である。

政策転換モデルと異なるのは、パラダイム変化－政策専門家の領域においてである。Hall は政策パラダイムシフトを主導するアクターは、官僚や研究者といった政策学習の回路の中で均衡を模索する国家内部の政策専門家ではなく、政治アクターであるとしている。しかし、先述のようにパラダイム変化－政策専門家の領域におけるアジェンダ・セッティング事例は、政策専門家が政策パラダイムシフトを主導している。

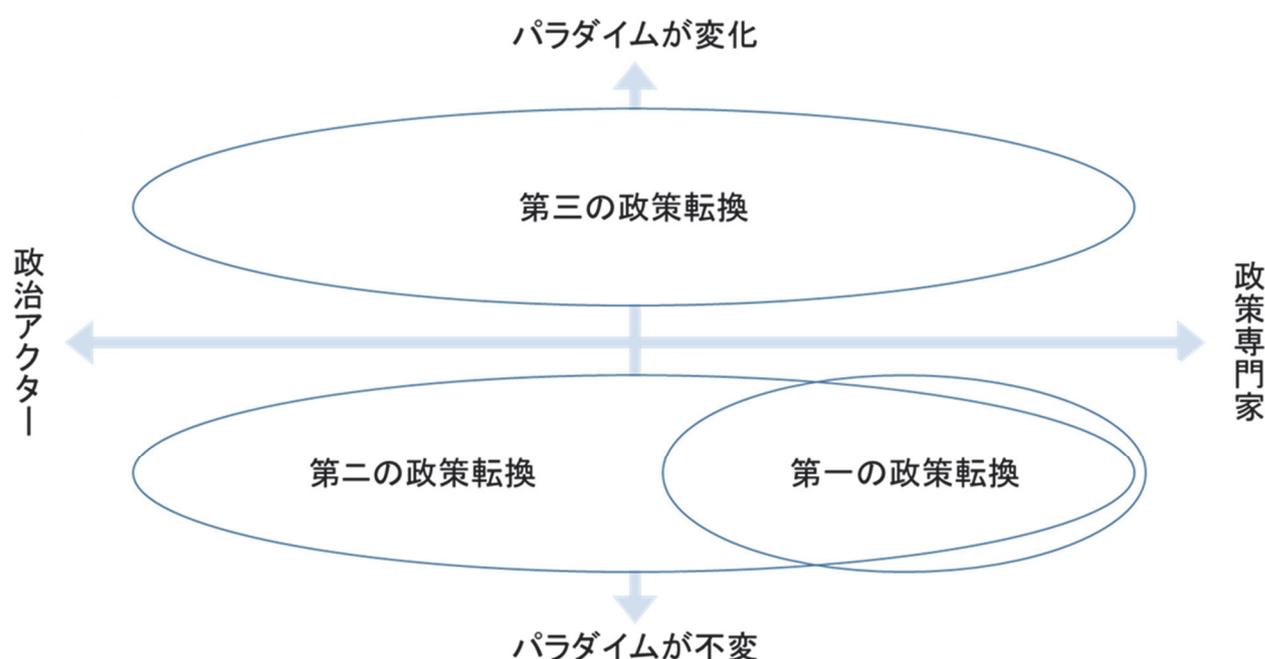


図 10 : 政策転換モデル (Hall 1993) との比較

パラダイム変化－政策専門家の特徴

この項目の特徴は政策専門家が潜在的な問題を広く認知させるアジェンダ・セッティングにより政策目標のパラダイムシフトを起こすことである。

定住外国人との共生と医師不足の共通点は、政策専門家が潜在的な問題が存在することを認めた上で、それが顕在化するような政策を立案し実行することによって、その問題を広く認識させることでアジェンダ・セッティングを行っていることである。定住外国人との共生においては、外国人が定住するにあたって十分な社会サービスを公的セクターから受けられないという潜在的な問題があった。入管法の 1990 年改正によって日系人が特定地域で急増することになるが、先の潜在的な問題から地域住民とのトラブルが発生し、問題が顕在化した。一方で医師不足においては、医師の負担増による医師不足が潜在的な問題であった。新医師臨床研修制度をトリガーにして、医局の崩壊、医師の引き上げ、医師のさらなる負担増が起こり、医師不足の問題が顕在

化した。このことから、政策専門家は専門とする政策領域に存在する潜在的な問題のアジェンダ・セッティングを、政策の立案、実行を通して行いうることが推察される。

政策の影響予測

定住外国人の共生と医師不足のもう一つの共通点は、政策専門家が政策の影響を予測していたことである。定住外国人との共生においては、入管法の1990年の改正によって日系ブラジル人が30万人程度流入することは予測されていた。また医師不足においては、新制度によって医局が崩壊し医師不足が顕在化することは予測されていた。このことから、政策の影響を予測することが可能であれば、潜在的な問題が認知されるような状況を政策の実施によって作ることができるだろう。

上記から、政策の影響を予測することがアジェンダ・セッティングにおいて、有効であることがわかった。その影響の予測が確かなのか事前に検証することができれば、より効果的なアジェンダ・セッティングが行えると考えられる。予測の検証について、入管法の1990年改正から示唆を得ることができる。

日系人は入管法の1990年改正をきっかけに急増したが、改正前から増加している。彼らは入管法の1982年の改正によって新設された「日本人の配偶者と子」という在留資格を使用して滞在していた。法務省は1987年に「外国人の就労に関する意識調査」を実施して、日系人が受け入れられていることとさらなるニーズがあることを確認している。1990年の改正の「定住者」という在留資格はこの「日本人の配偶者と子」という在留資格を拡大したものである。

このことは、政策立案者は政策の影響を事前に小規模なテストを行うことによって確かめることが可能であることを示唆している。これにより、政策立案者は、その政策の影響が政策立案者にとって望ましいアジェンダ・セッティングにつながるかどうかを、確認することができる。

1.4.HLW 処分政策に対する示唆

原子力発電を含む電力政策は、環境保護 VS 経済発展、あるいは社会民主主義 VS 新自由主義といった根本的な価値対立の下で議論される政策であるが、一方で経済界・政府・野党政治家らの利害調整の問題でもある。ドイツの事例でも、アジェンダ・セッティングは政治家主導で行われてきた。一方、放射性廃棄物処分は、(原子力発電と切り離して議論されるべきであるが)電力政策や地域政策(自由 VS 平等)などに関わっており、根本的価値対立を踏まえた政策的議論を必要とする上、NIMBYが観察されるように、社会全体として見れば問題解決に向けた危機感には十分といえない。本研究で得た類型化(仮説)に基づけば、放射性廃棄物処分に関するアジェンダ・セッティングは、官僚ないし専門家が、当該政策課題とは離れた領域における小さな政策による波及効果で起こすことを目指すというオプションが提示される。

具体的に「当該政策課題とは離れた領域における小さな政策」とは何か?定住外国人の問題でいえば、彼らに対して直接社会保障や選挙権等の権利を認めようとするような移民政策は国民の反対を受けやすいが、入管法の改正という(一見)定住外国人と共生する未来とは関係のなさそうな政策が、結果的に外国人の定住を既成事実化し、彼らに対する社会保障に関する政策的議論

を容易にした。放射性廃棄物処分においても、たとえば地方自治など地域に関わる政策の波及効果で、処分施設という一種の迷惑施設に対する国民の認識をポジティブに変化させるようなことが考えられるのではないか。具体的なアジェンダ・セッティング手法については、本研究では事例に基づくアナロジーで発想することが念頭に置かれているので、今後のさらなる事例分析を待って検討する必要があるが、ひとつアイデアを出すとすると、公立病院・診療所の機能連携推進（病院統合）や、地方交付税の戦略的交付領域設定（たとえば医療等、全体の交付額の実質的減額とセット）、地域における社会的企業家支援などによって、地域の前向きな「まちづくり」（生き残り）戦略のひとつとして迷惑施設の受け入れによる資金確保をとらえるように変化させることなどがあり得ないだろうか。

今後、引き続き原子力発電ならびに放射性廃棄物分野におけるアジェンダ・セッティングの事例分析を深めて同分野の特異性を明らかにするとともに、仮説的に得たアジェンダ・セッティングの類型を用いてアナロジーによるアジェンダ・セッティングのデザイン手法を確立することを目指す。それにより、上で述べたようなアジェンダ・セッティングの可能性を精緻に検討し、より効果的なプロセスを設計すること、ひいては社会的合意の下で高レベル放射性廃棄物処分が進むことに貢献することを目指す。

2. HLW 処分に関わる人々の態度についての社会心理学的分析

2.1. はじめに

本研究では、平成 22 年 2 月と平成 23 年 2 月、平成 24 年 2 月に、一般の回答者に対してインターネットを用いたアンケート調査を実施してきた。主な検討内容は、平成 22・23 年調査においては、信頼・公正・フレーミング・感情に焦点を当てた、行政の信頼やリスク認知・ベネフィット認知と高レベル放射性廃棄物処分事業に対する態度（交付金に対する後ろめたさ（平成 22 年調査）および処分場の受け入れ態度）の関係、平成 24 年調査においては、高レベル放射性廃棄物処分場立地において提案されている複数の政策（1 か所立地、複数立地、中間貯蔵継続）に対する人々の選好などについてである。

また、平成 23 年 3 月における東日本大震災を受け、原子力発電に関する事業における行政の信頼にどのような変化があったのか、その変化の大きさを規定する要因は何であったのか、といった点も、震災前後の調査の両方に回答した回答者のデータを用いて検討した。

さらに、震災から 4 年弱が経過した現在、どのような変化が起こっているのか（たとえばリスク認知が漸減している可能性など）を継続的にモニタリングするため、過去と同様の Web アンケート調査を実施した。

2.2. 過去のデータの分析：特に震災前後の変化に着目して

【調査の設計】

- ・調査方法：インターネット調査
- ・調査期間：2013（平成 25）年月日～月日
- ・調査地域：全国
- ・平成 23 年度に行われたインターネット調査への回答者 4,000 名のうち、2,495 名をパネル回答者として再抽出した。加えて、2,705 名を新たに新規回答者として抽出した。性別（男女）×年齢（五区分）の割付表は表 2-1 の通りである。
- ・行政の信頼に関する質問においては、平成 22 年・平成 23 年回答者は、「国の行政機関」への信頼に回答する群、「お住まいの都道府県の行政」への信頼について回答する群、そして「お住まいの市区町村の行政」の信頼について回答する群の 3 群にランダムに割り当てられた。

表 2-1. 2013 年調査回答者の基本的属性

		20～29歳	30～39歳	40～49歳	50～59歳	60～69歳	計
3波すべてに 回答	男性	44	89	163	166	167	629
	女性	48	117	127	123	94	509
	小計	92	206	290	289	261	1138
2波(2012年と 2013年)のみ に回答	男性	65	111	175	216	198	765
	女性	62	126	125	145	134	592
	小計	127	237	300	361	332	1357
新規回答者	男性	209	317	294	289	214	1323
	女性	280	330	303	265	204	1382
	小計	489	647	597	554	418	2705
合計		708	1090	1187	1204	1011	5200

・原子力発電所関連施設が立地している市郡からも可能な限りサンプリングした。各原発立地地域における回答者数は表 2-2 の通りである。

表 2-2. 各原発立地地域の回答者数

発電所名	住所	度数
泊発電所	北海道古宇群	5
東通原子力発電所	青森県下北郡	6
女川原子力発電所	宮城県石巻市・牡鹿郡	87
福島第一・第二原子力発電所	福島県双葉郡	9
東海第二発電所	茨城県那珂郡	47
柏崎刈羽原子力発電所	新潟県柏崎市・刈羽郡	67
浜岡原子力発電所	静岡県御前崎市	23
志賀原子力発電所	石川県羽咋郡	17
敦賀発電所	福井県敦賀郡	70
大飯発電所・高浜発電所	福井県大飯郡	10
美浜発電所	福井県三方郡	15
島根原子力発電所	島根県松江市	177
伊方発電所	愛媛県西宇和郡	5
玄海原子力発電所	佐賀県東松浦郡	0
川内原子力発電所	鹿児島県薩摩川内市	60
	その他地域	372
合計		970

高レベル放射性廃棄物処分事業にかかわる質問に回答するために、回答者には、以下の説明文を提示した後、各質問に回答を行ってもらった。

原子力発電所からは発電に伴って放射性廃棄物が必ず発生しています※。今後の原子力発電政策のあり方については不透明なところがあるものの、少なくともこの廃棄物の処理問題は避けて通れません。

※ここでの「廃棄物」とは、原子力発電所から発生している放射能を有するゴミのことです。

このような原子力発電の利用に伴い発生する**高レベル放射性廃棄物**は、原子力発電所で使用した燃料からウラン・プルトニウムを分離・回収した後に残る液状の廃棄物です。

日本では、**地層処分**によってこの**高レベル放射性廃棄物**に対応する方針となっています。**地層処分**とは地下 300m を超える深さの地層中に数万年以上の期間閉じ込めるというもので、現時点で最も問題点が少なく、実現可能な手法として世界各国で採用されている方法です。

この処分施設立地に向けて、日本では、まず過去の地震等の自然現象に関する文献・資料や、航空写真などの資料に基づいて調査を行う**文献調査**、ボーリング調査等を行う**概要調査**、地下施設における**精密調査**という 3 段階のプロセスを経て、最終的に日本全国から 1 カ所の自治体（市町村または都区部）を処分施設立地地域として選定することが法律で定められています。

最初の**文献調査**が実施される自治体と都道府県には、地域振興対策費等として、調査期間合計で **20 億円が交付**されます。また**概要調査**に進んだ場合には、調査期間の合計で最大 **70 億円が交付**されます。**精密調査**、建設、操業に伴う交付金額やその期間については、現在、制度化が進められている状態です。

現在は、全国の市町村に対して第一段階となる**文献調査**に関する公募が実施されている段階です。

なお、これまでの調査および平成 27 年調査で実施予定の調査における各調査項目（基本属性にかかると項目は除く）の有無をまとめると以下ようになる。

・調査項目の一覧（平成 27 年調査は予定）

	メディアの影響	原子力規制委員会への期待	社会性	原発・地震のリスクの見積	原子力発電政策と高レベル放射性廃棄物処分場問題の関係	期待するエネルギー源	原子力発電増設への賛否	制度に対する安心	行政への期待	国内処分の是非	勉強会への参加意欲	科学技術に対する信頼	原子力発電についての評価	被害の大きさ・生起確率の見積	受け入れ態度	原発関連用語の知識	政治的知識	政治・原発報道への注意と会話	行政への信頼
23	○	○	○			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
24	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
25	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
27	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

【調査項目・単純集計結果】

以下に、調査で測定した項目とその単純集計を示す。行政機関（国・都道府県・市区町村）ごとに尋ねている場合は、条件ごとに差がみられるかどうか検討している。

○回答者の属性

性別

「あなたの性別をお選びください」

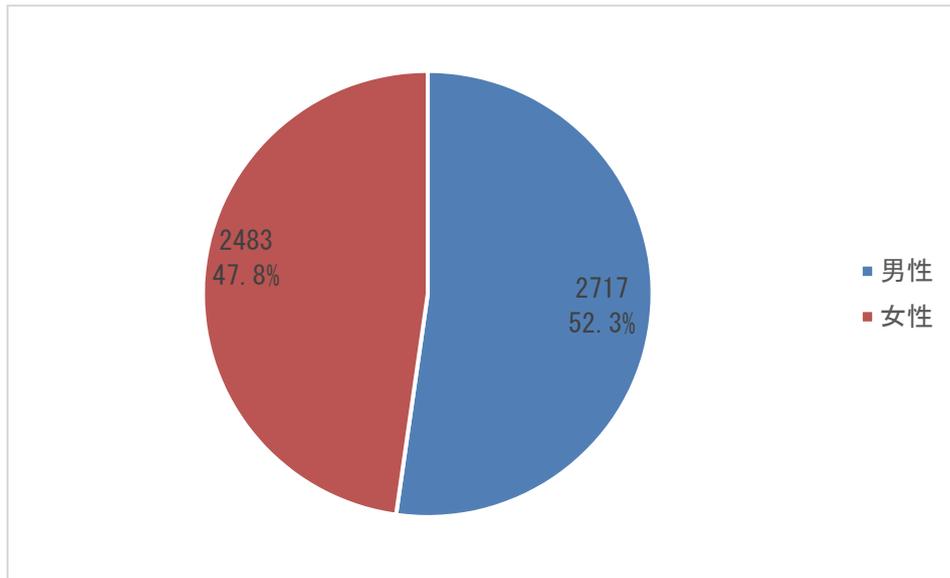


図 2.3 回答者の性別

年齢

「あなたの年齢をお知らせください」

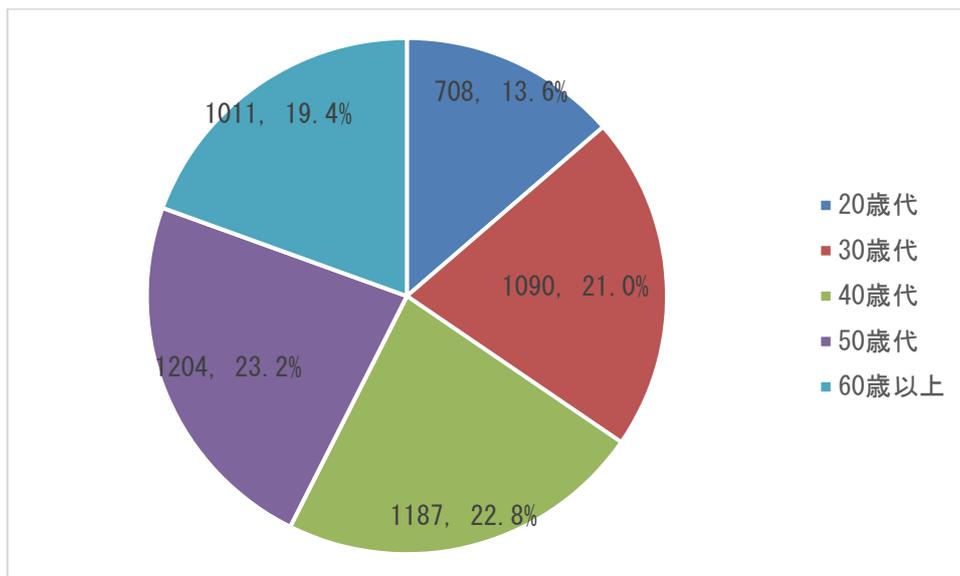


図 2.3 回答者の年齢

職業

「あなたの現在のお仕事についてお伺いします。あなたは普段どのような仕事をなさっていますか。当てはまるものを一つお選びください。」

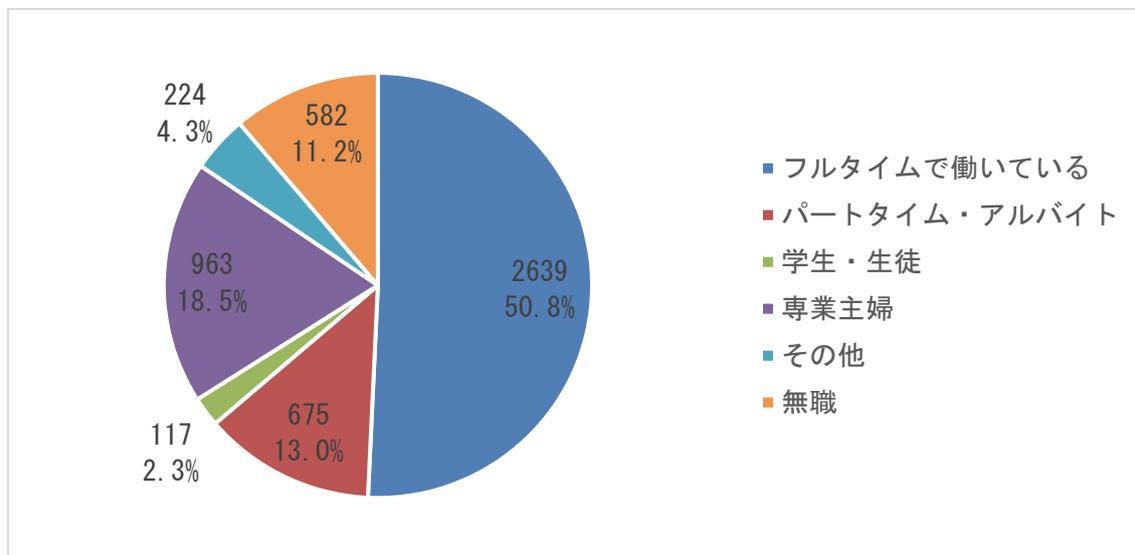


図 2.5 回答者の職業

○行政への信頼※

※ここでは、「国の行政機関」への信頼、「お住まいの都道府県の行政」への信頼、「お住まいの市区町村の行政」への信頼を合算した集計結果を示している。

行政への信頼

「あなたは行政をどの程度信頼できると思いますか」(1「信頼できる」～4「全く信頼できない」)

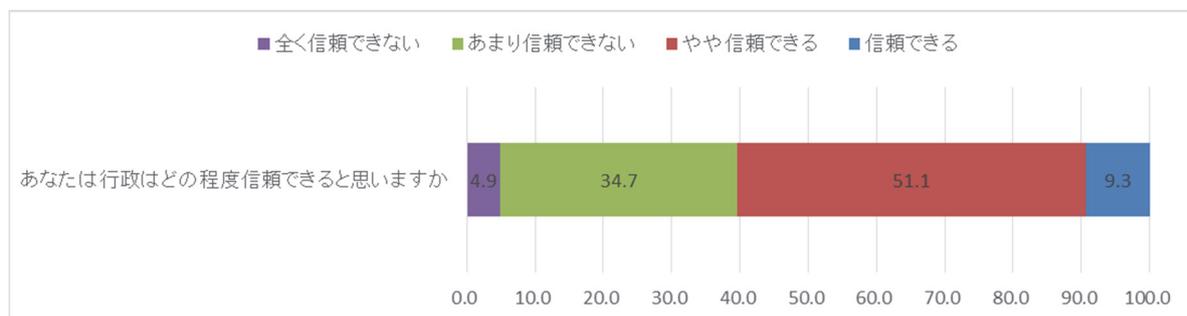


図 2.6 行政の信頼

行政の職業倫理

「公務員としての誇りを持っている」「公務員として市民に対するサービスを心掛けている」「社会的責任をよく理解している」「現場の問題を速やかに改善・対処できる」「行政として対応すべき行為をしないような「現場の不作為」を放置しない」「市民として誠実な職員が働いている」「職員として安心できる人が働いている」の七項目によって測定した。(1「そう思う」～4「そう思

わない))

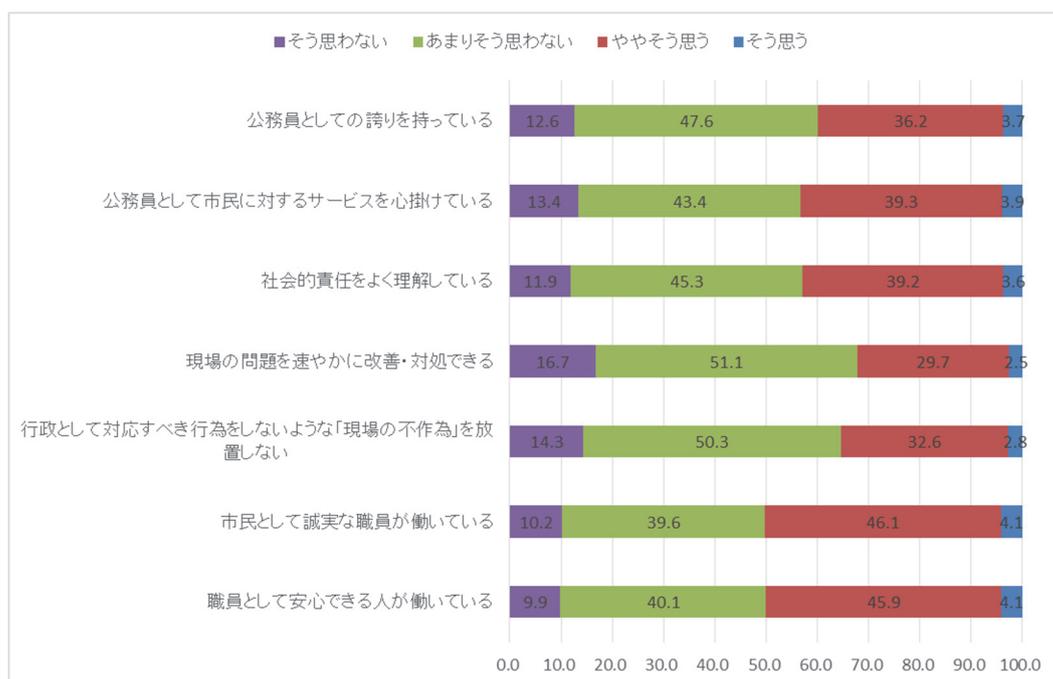


図 2.7 行政職員の職業倫理

行政の公平性

「行政は国民を公平に扱っている」「行政はあなたの地域の人たちを公平に扱っている」「行政はあなたのことを公平に扱っている」(1「そう思う」～4「そう思わない」)

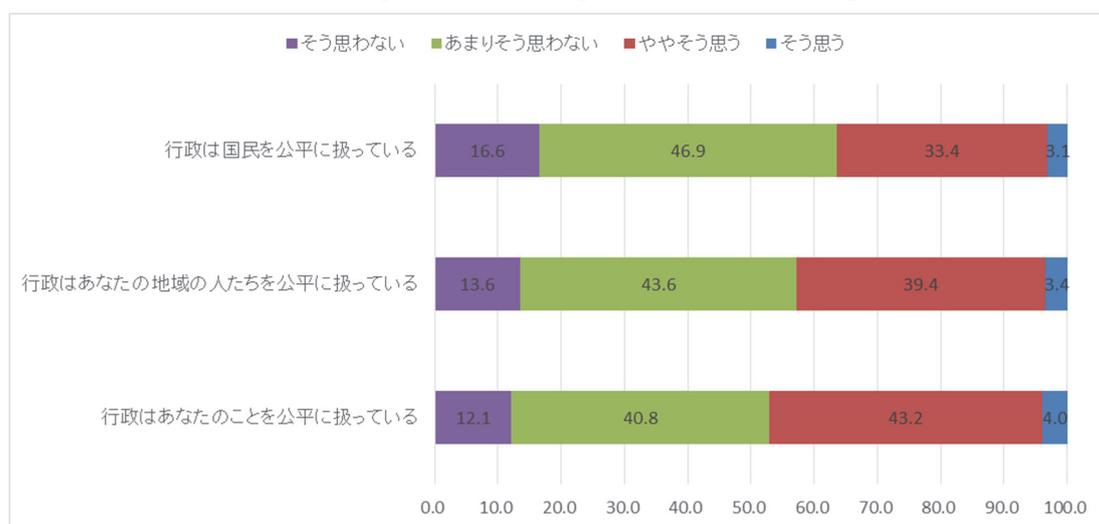


図 2.8 行政の公平性

担当大臣・首長の能力

「行政の首長は、職務に関する十分な専門知識を持っている」「行政の首長は、職務に関する十分な専門的技術を持っている」「行政の首長は、職務に関する十分な政策立案能力を持っている」

※ (1「そう思う」～4「そう思わない」)

※「国の行政機関」の信頼について尋ねた群には、「各担当大臣は～」と尋ねた。

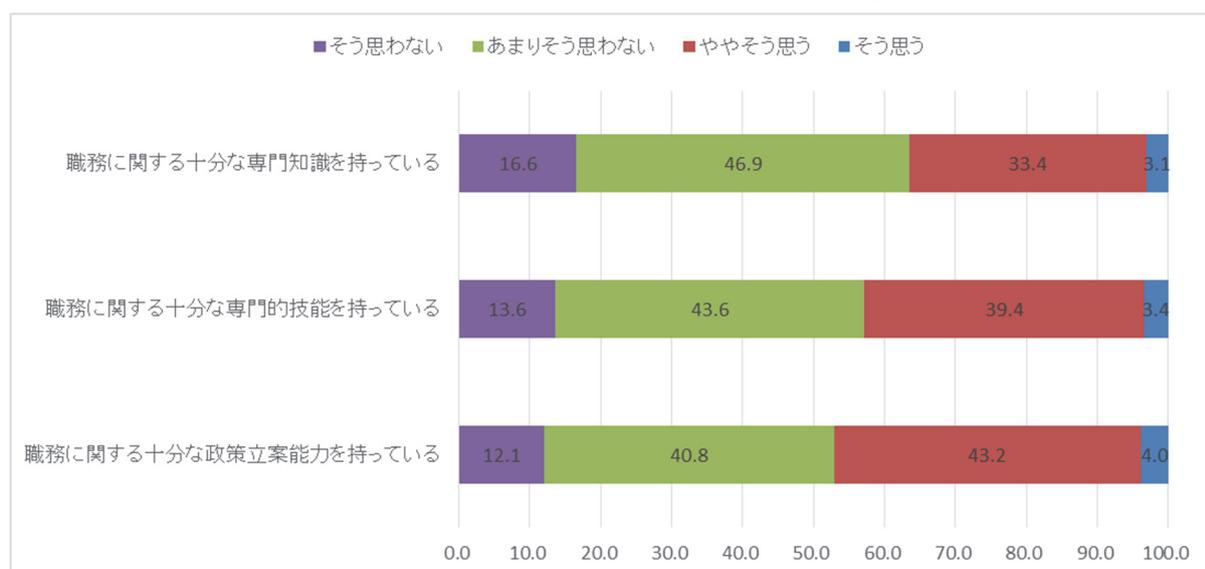


図 2.9 首長の能力

行政職員の能力

「行政の職員は、職務に関する十分な専門知識を持っている」「行政の職員は、職務に関する十分な専門的スキルを持っている」「行政の職員は、職務に関する十分な政策立案能力を持っている」(1「そう思う」～4「そう思わない」)

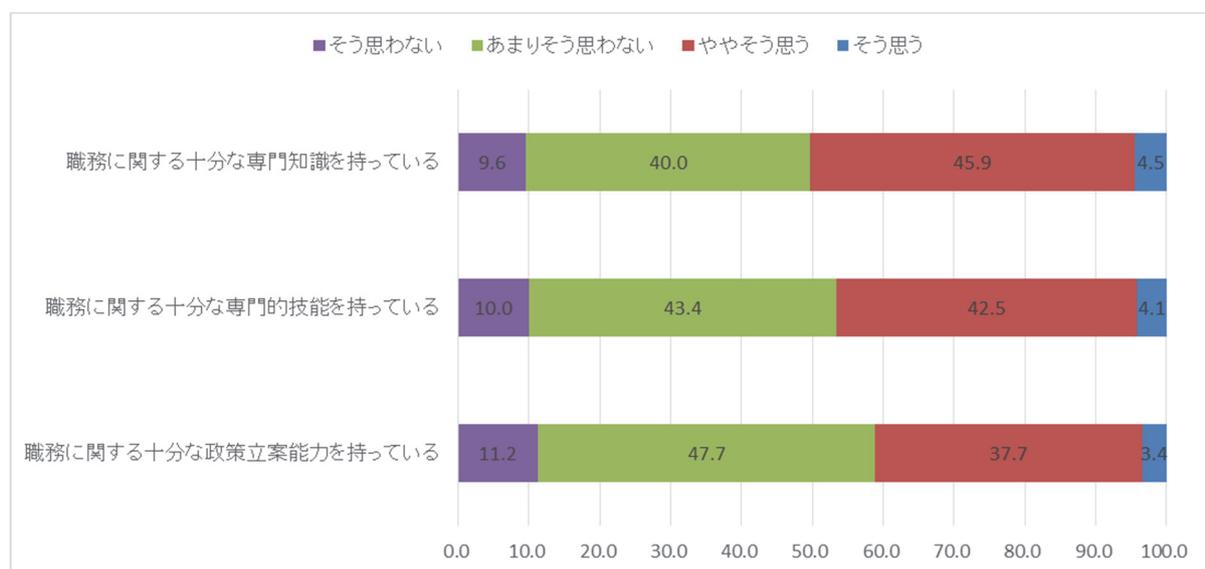


図 2.10 行政職員の能力

行政の監視性

「行政の仕事は法令に従い行われるため、職員の不正は難しい」「行政に対する監視の目の届かないところが、たくさんある」「過去に起きた行政上の問題を教訓にして行政が改善されている」「行政が問題を起こしても、市民の側にはそれを見抜く情報が入手できない」「行政が問題を起こしても、市民の側にはそれを見抜く能力がない」(1「そう思う」～4「そう思わない」)

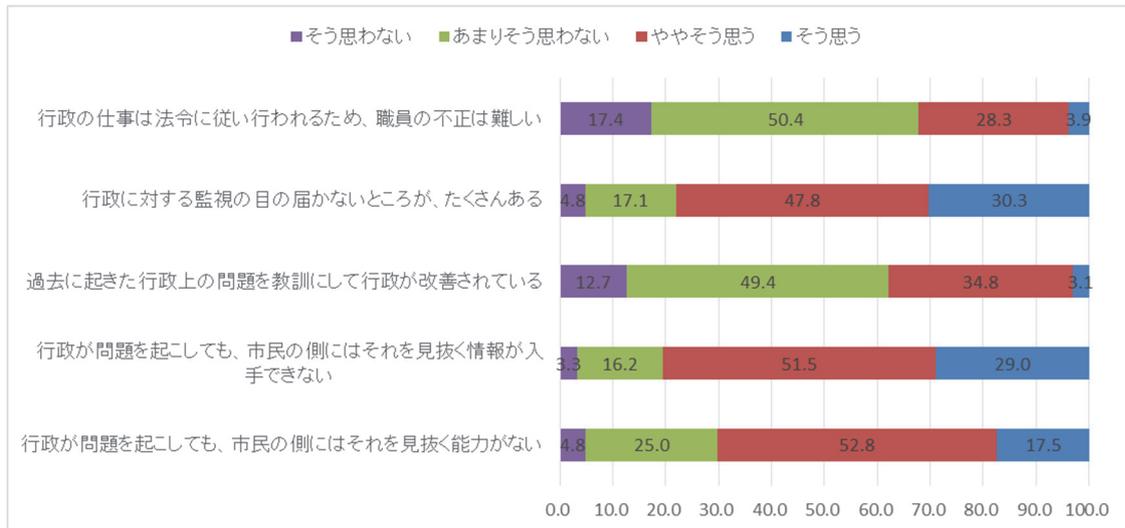


図 2.11 行政の監視性

行政の透明性

「財務状況を適切に公表している」「人員削減の状況を適切に公表している」「行政に対する苦情処理の情報を適切に公開している」「行政の社会的責任の自己点検を適切に公表している」「コンプライアンス（法令順守）を適切に自己点検している」「問題発生時の情報提供を適切に行っている」（1「そう思う」～4「そう思わない」）

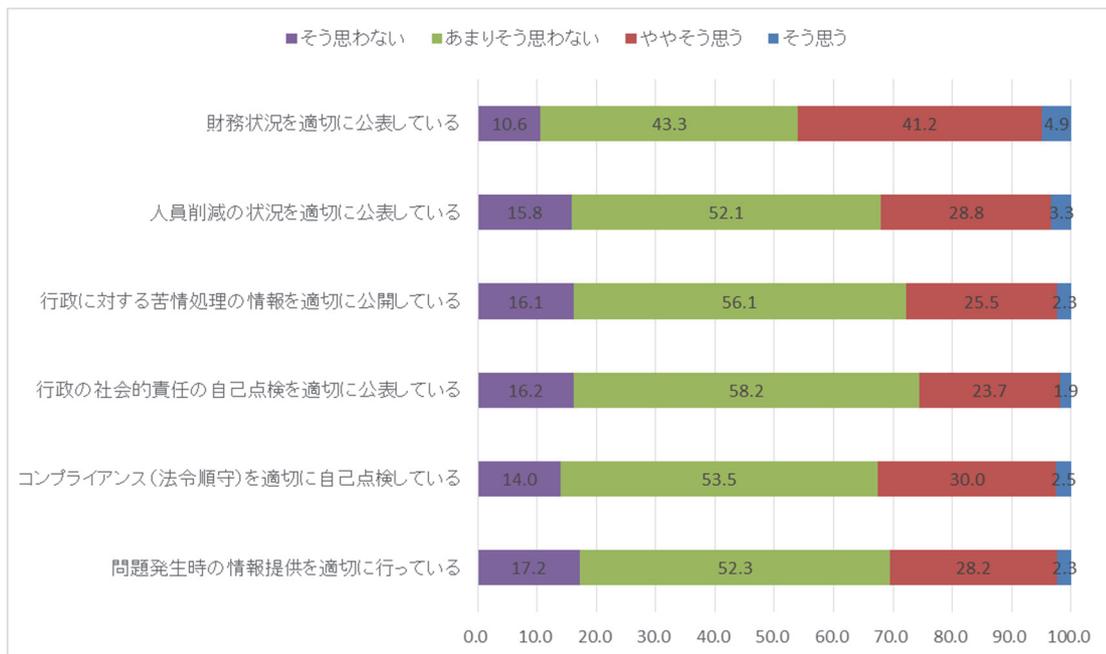


図 2.12 行政の透明性

政治的効力感

「行政機関での手続きは、あまりにも複雑なので、自分にはよく理解できないことがある」「自分には行政のすることに対して、それを左右する力はない」「問題や苦情があっても、行政

に行っても無駄だと思う」「行政の問題解決には、市民一人一人が行動を起こすことで、市民の声を反映させることができる」「行政機関の職員は、大雑把に言って、市民のことを考えていないと思う」（1「そう思う」～4「そう思わない」）

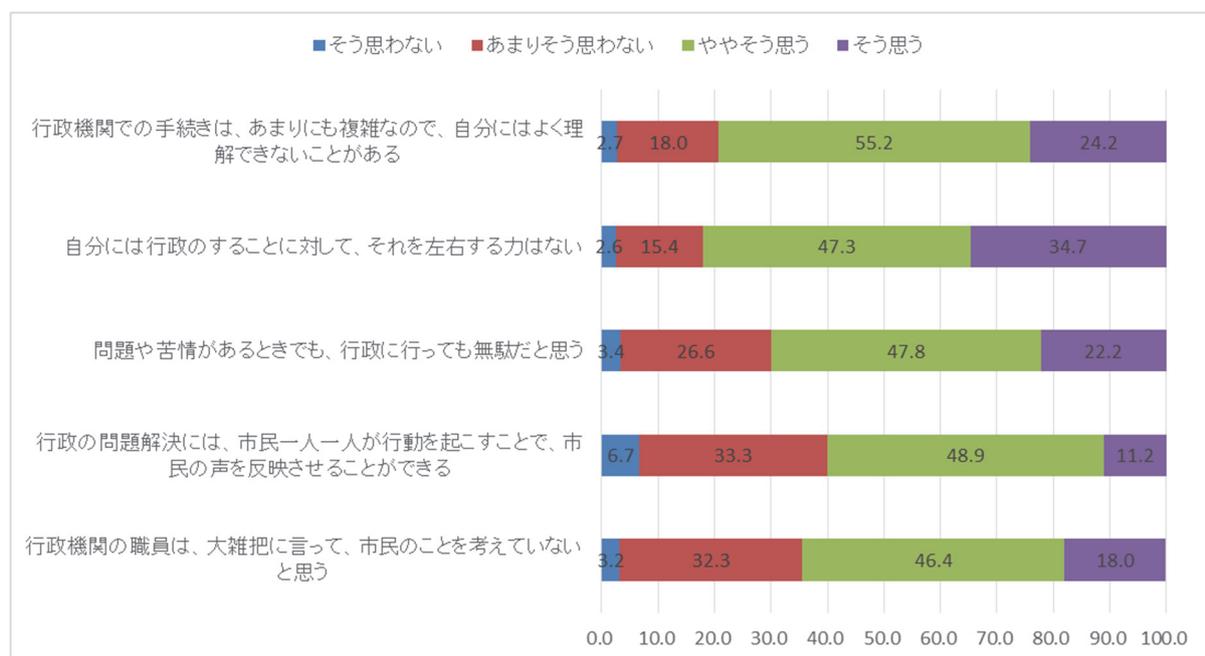


図 2.13 政治的効力感

○政治・原発報道への注意

「あなたは普段、政治上の出来事にどれくらい注意を払っていますか。」「あなたは普段、原子力に関する報道にどれくらい注意を払っていますか。」（1「全く注意を払っていない」～4「いつも注意を払っている」）

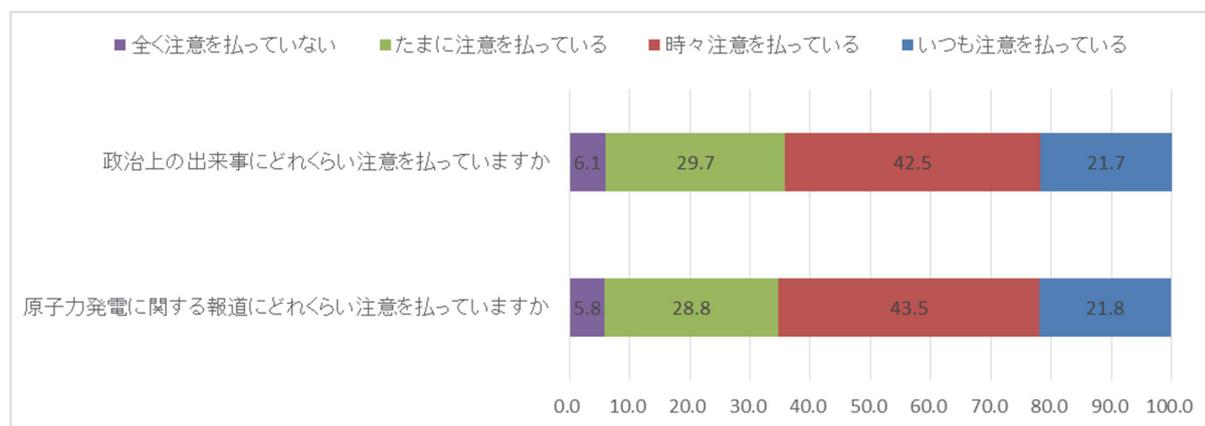


図 2.14 政治・原発報道への注意

○政治・原発報道についての会話

「あなたは普段、友人・家族・同僚と政治についてどれくらい話すことができますか。」「あなたは普段、友人・家族・同僚と原子力発電についてどれくらい話すことができますか。」（1「ほとんどない」～4「頻繁にある」）

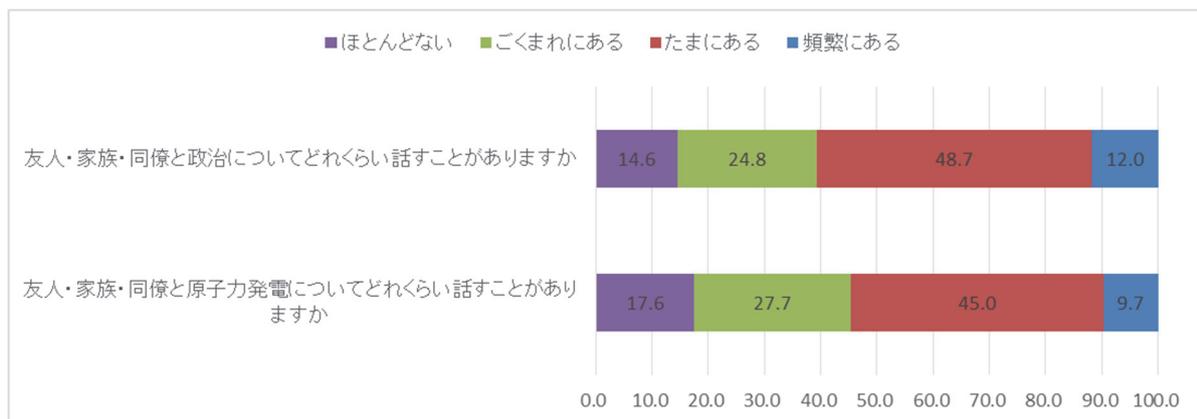


図 2.15 政治・原発についての会話

○原発関連用語の知識

「あなたは、原子力発電に関知ることと言われたり問題にされたりしている次の出来事や事柄について、どのくらいよく知っていますか」という問いにおいて、「高レベル放射性廃棄物」「使用済み核燃料」「中間貯蔵」「核燃料プール」「核燃料の再処理」「地層処分」「災害廃棄物（震災がれきなど）」について尋ねた。(1「全く知らない」～4「人に説明できる」)

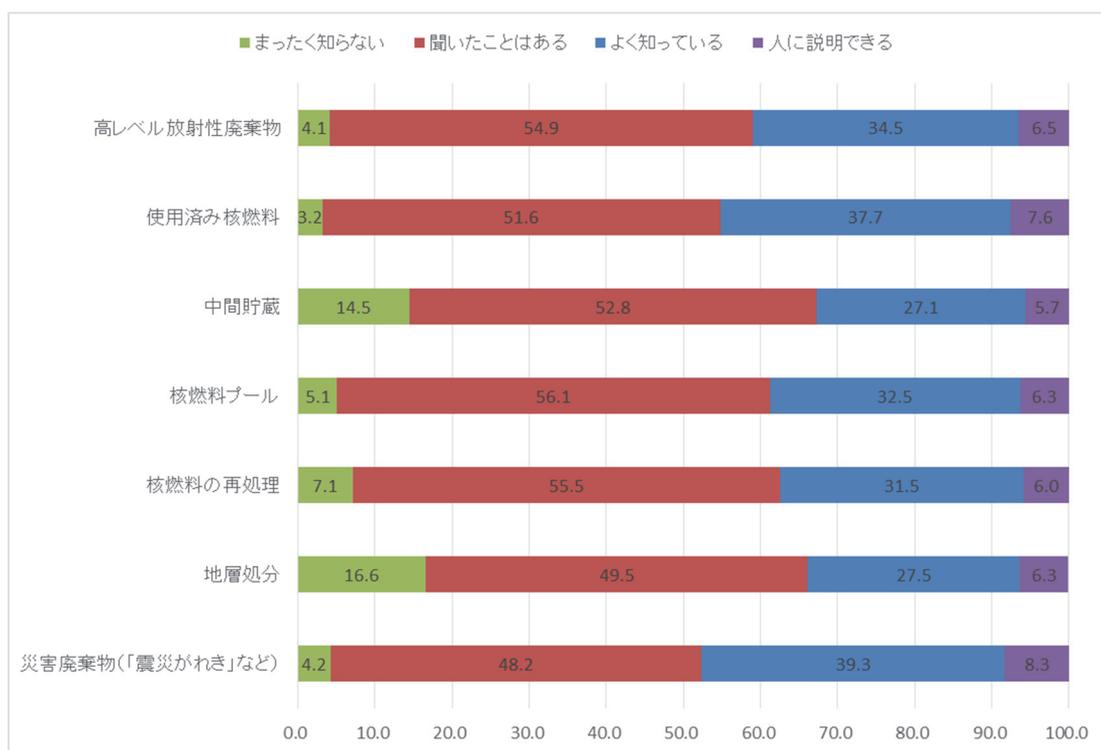


図 2.16 原発関連用語の知識

○放射性廃棄物である「がれき」・放射性廃棄物処分場および中間貯蔵施設受け入れへの態度

「仮に、あなたのお住まいの自治体が原発事故の放射性廃棄物である「がれき」の受け入れを表明した場合、そのことについてどう思いますか。」「仮に、あなたのお住まいの自治体に高レベル放射性廃棄物の地層処分場が建設されると想定した場合、そのことについてどう思いますか。」

「仮に、あなたのお住まいの自治体に高レベル放射性廃棄物の中間貯蔵施設が建設されると想定した場合、そのことについてどう思いますか。」(1「絶対に受け入れたくない」～5「受け入れても良い」)

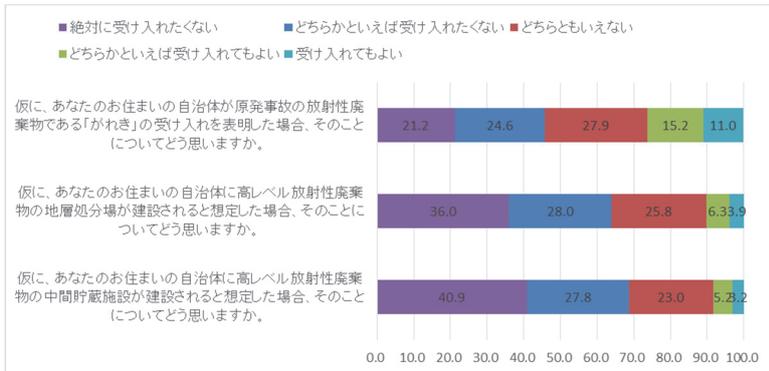


図 2.17 がれき・処分施設受け入れへの態度

○被害の大きさの見積もり

「高レベル放射性廃棄物の地層処分場において事故が発生したとしたら、その際に直接的・間接的に被害を受ける人は何人くらいいると思いますか。」「将来適切な処分方式が考案されるまで高レベル放射性廃棄物を貯蔵しておく中間貯蔵施設において事故が発生したとしたら、その際に直接的・間接的に被害を受ける人は何人いると思いますか。」(1「0人」～7「10万人以上」)

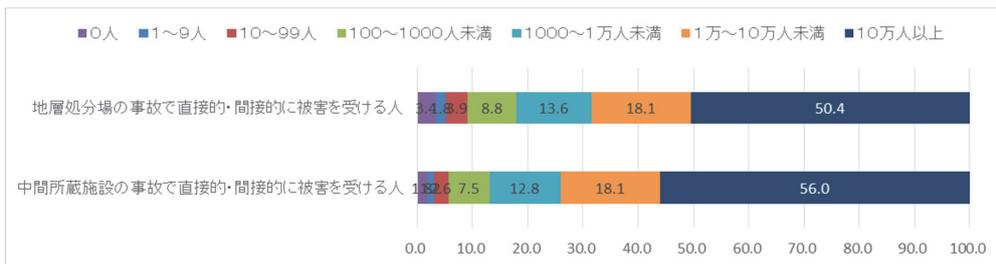


図 2.18 被害の大きさの見積もり

○被害の生起確率の見積もり

「高レベル放射性廃棄物の地層処分場の建設から20年以内に、放射能漏れなどの事故が起きる確率は何%くらいであると思いますか。」「高レベル放射性廃棄物の中間貯蔵施設の建設から20年以内に、放射能漏れなどの事故が起きる確率は何%くらいであると思いますか。」(1「0%」～11「100%」まで10%刻みで測定)

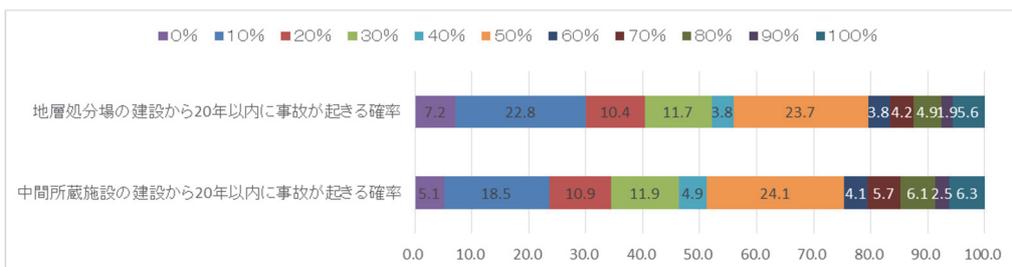


図 2.19 被害の生起確率の見積もり

○原子力発電についての評価

「原子力発電は、他のエネルギーに比べて経済性に優れている」「原子力発電は、他のエネルギーに比べて環境に優しい」「原子力発電は、他のエネルギーに比べて安全性に優れている」(1「思う思う」～4「そう思わない」)

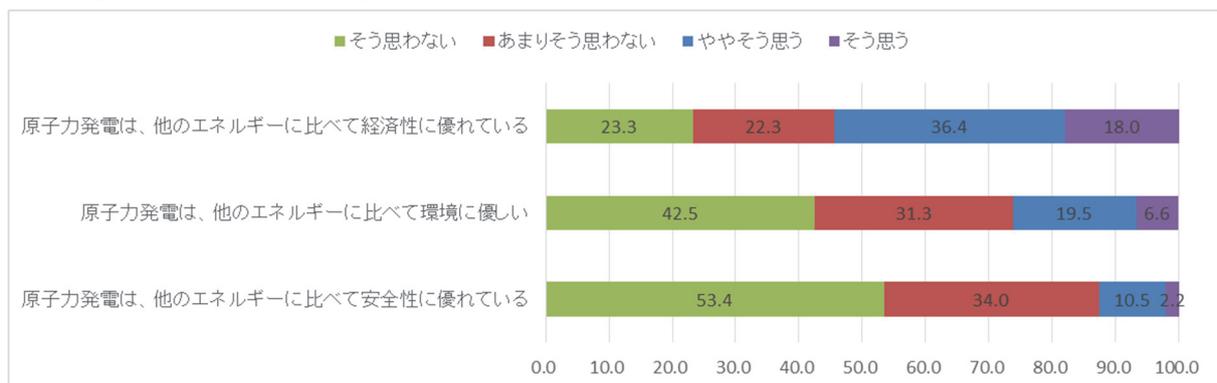


図 2.20 原子力発電についての評価

○科学技術に対する信頼（本年度より実施）

科学者・技術者・学会等の専門家集団への信頼

「あなたは、科学者の話は信頼できると思いますか。」「あなたは、技術者の話は信頼できると思いますか。」「あなたは、学会等の専門家集団は信頼できると思いますか。」(1「信頼できる」～4「全く信頼できない」)

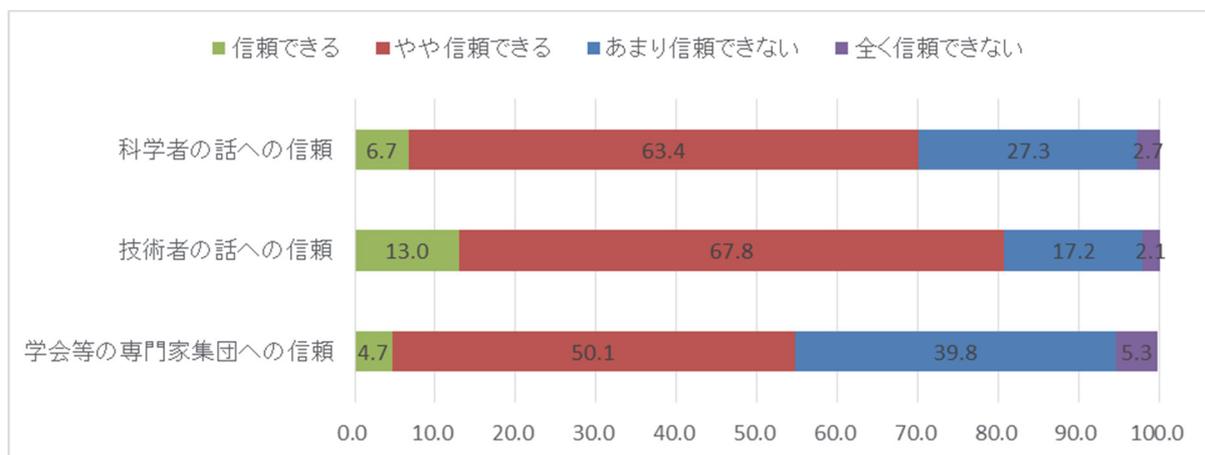


図 2.21 科学者・技術者・学会等の専門家集団への信頼

科学技術への信頼

「あなたは、社会の新たな問題はさらなる科学技術の発展によって解決されると思いますか。」(1「思う思う」～4「全くそう思わない」)

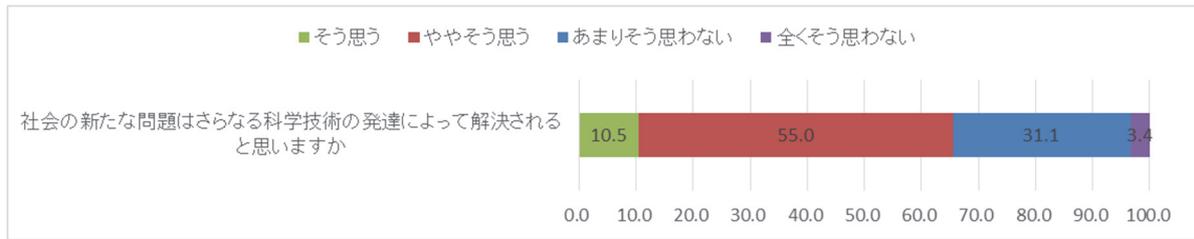


図 2.22 科学技術への信頼

日本の科学技術への信頼

「あなたは、日本の科学技術は諸外国に比べ信頼できると思いますか。」(1「信頼できる」～4「全く信頼できない」)

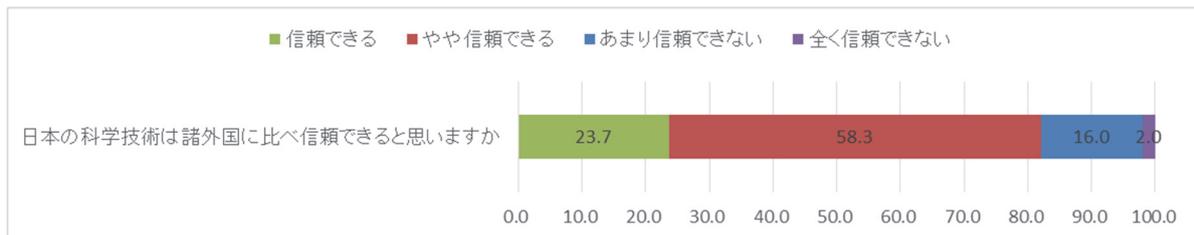


図 2.23 日本の科学技術への信頼

専門家による政策決定への信頼

「あなたは、行政の政策が科学技術の専門家の意見で決まるのは良いことだと思いますか。」(1「よいことだと思う」～4「よいことだと思わない」)

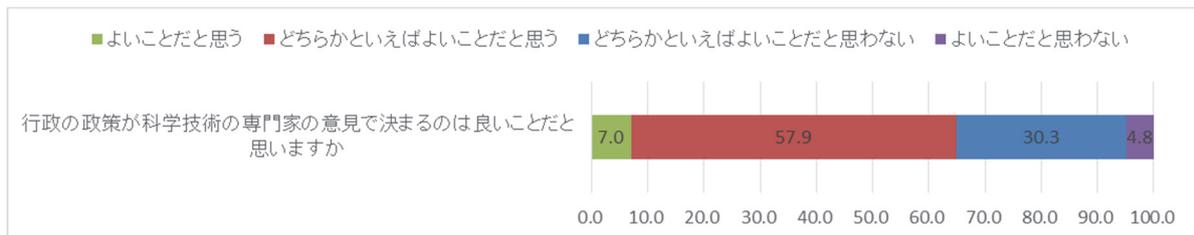


図 2.24 専門家による政策決定への信頼

○勉強会への参加意欲 ※本年度より質問せず

○国内処分の是非 ※本年度より質問せず

○行政への期待 ※本年度より質問せず

○制度に対する安心 ※本年度は質問せず(平成27年は予定)

○原子力発電増設への賛否

「ある人々は日本のエネルギー問題を解決するため原子力発電を増やすべきだと言っています。あなたはこれに賛成ですか反対ですか。」(1「強く賛成」～4「強く反対」)

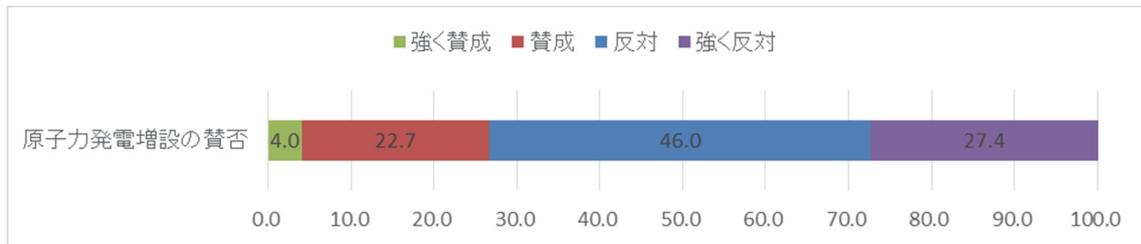


図 2.25 原子力発電増設への賛否

○原子力発電政策と高レベル放射性廃棄物処分場問題の関連について

「原子力発電政策と高レベル放射性廃棄物処分場問題はそれぞれ別個の問題として考えるべきだ」「脱原発政策が推進されれば、おのずと高レベル放射性廃棄物処分場問題は解決する」「高レベル放射性廃棄物処分場問題を解決するためには、現在の原子力発電政策を維持することが重要だ」「これまでの原子力発電政策を維持するためには、高レベル放射性廃棄物処分場問題を解決することが重要だ」(1「そう思わない」～4「そう思う」)

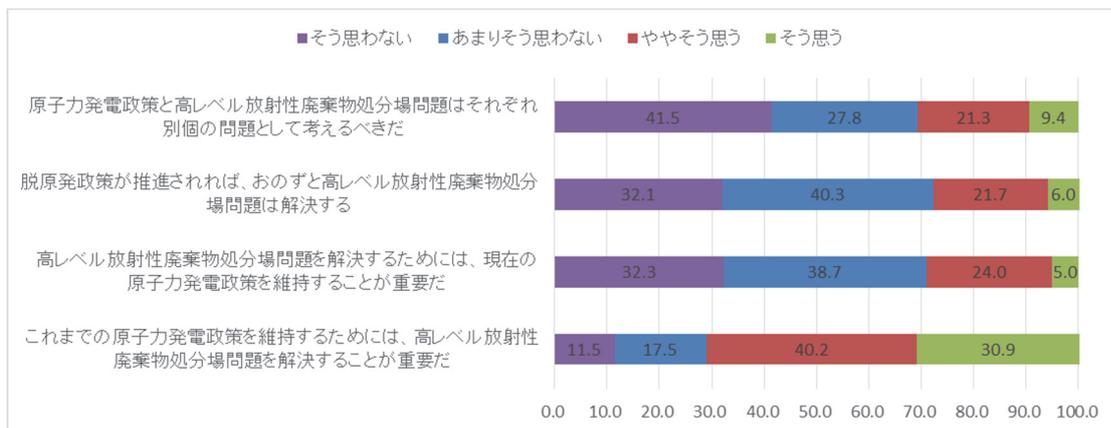


図 2.26 原子力発電増設への賛否

○原発・地震のリスクの見積もり ※本年度は質問せず（平成 27 年は予定）

○原子力規制委員会への期待（本年度より実施）

「新たに発足された原子力規制委員会による原子力発電の規制・監視の厳格化にあなたはどの程度期待していますか。」(1「とても期待している」～4「全く期待していない」 および 5「原子力規制委員会について知らなかった」)

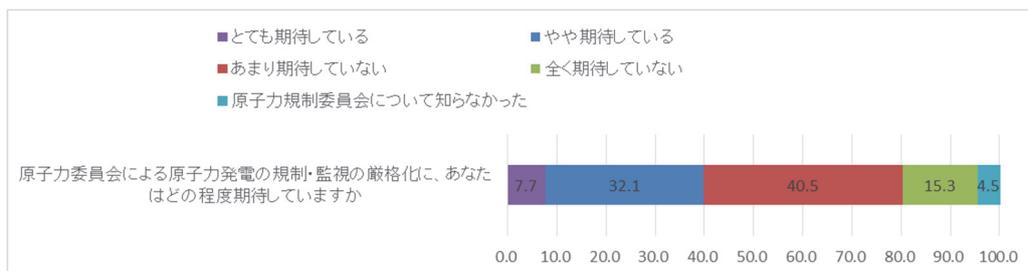


図 2.27 原子力発電増設への賛否

【調査項目・単純集計結果】

以下に、平成 23(2011)年の調査（以下、第一波調査）・平成 24(2012)年の調査（以下、第二波調査）・平成 25(2013)年の調査（以下、第三波調査）の間で比較可能な項目について、平均値に統計学的に優位な変化があったかどうかを検討した。各波の調査における変化をとらえるため、ここではパネル回答者のデータのみを使用した。

○行政への信頼

行政への信頼に関する項目群は、全般的な信頼に対する質問のほか、「行政職員の職業倫理」「公平性」「行政の首長の能力」「行政職員の能力」「監視性」「透明性」「政治的効力感」の 7 つの尺度でとらえた。

2012 年の調査結果を用いた因子分析によって、本調査で測定した「監視性」以外の項目群は、本研究で想定している行政への信頼の各概念にうまく分類されることがわかった。したがって、以下では全般的な信頼に対する質問の結果と、「監視性」を（2012 年の調査結果の分析に基づき）二つに分け、信頼に関する 8 つの尺度に該当する質問への回答についての結果を示す。

以下には、各信頼の概念について、「国の行政」「都道府県の行政」「市区町村の行政」のそれぞれの行政レベルの平均値を示す。縦軸が信頼の高さを示すように、「監視性」の第二主成分の主構成要素および政治的効力感を除き、得点を逆転してある。

また、2012 年と 2013 年の調査の値、および、参考のため 2011 年の調査と 2012 年の調査の値に統計学的に有意な差があったかどうかの検定結果を各図とともに示してある。ただし、それぞれ両者の調査に回答した者の平均をとっているため、2012 年の調査についての平均値は一致しない。

行政への信頼

「あなたは行政をどの程度信頼できると思いますか」（1「信頼できる」～4「全く信頼できない」）

t値/p値	2011-2012
国の行政	|t|(618) = 4.90, p<.001
都道府県の行政	|t|(612) = 5.07, p<.001
市区町村の行政	|t|(617) = 4.94, p<.001
t値/p値	2012-2013
国の行政	|t|(805) = 9.03, p<.001
都道府県の行政	|t|(840) = 5.19, p<.001
市区町村の行政	|t|(845) = 1.39, n.s.

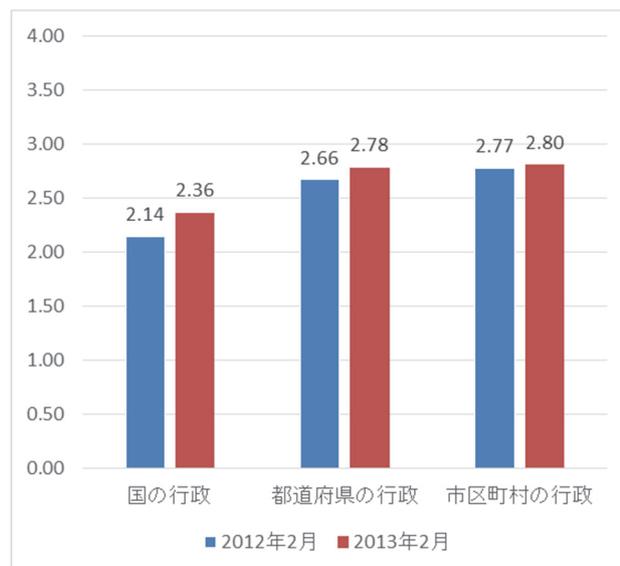
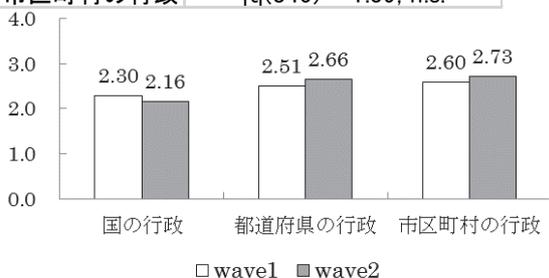


図 2.28 行政への信頼の変化

行政の職業倫理

「公務員としての誇りを持っている」「公務員として市民に対するサービスを心掛けている」「社会的責任をよく理解している」「現場の問題を速やかに改善・対処できる」「行政として対応すべき行為をしないような「現場の不作為」を放置しない」「市民として誠実な職員が働いている」「職員として安心できる人が働いている」の七項目によって測定した。(1「そう思う」～4「そう思わない」)

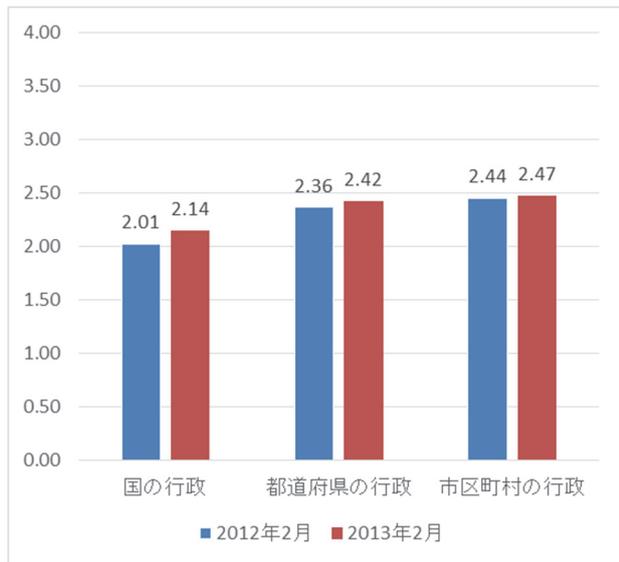
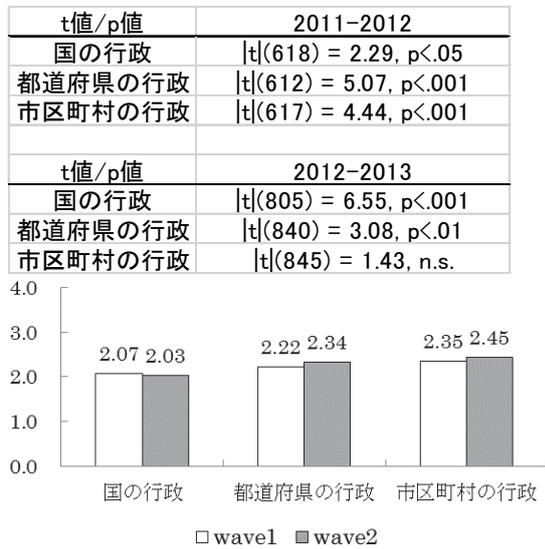


図 2.29 行政の職業倫理についての認識の変化

行政の公平性

「行政は国民を公平に扱っている」「行政はあなたの地域の人たちを公平に扱っている」「行政はあなたのことを公平に扱っている」(1「そう思う」～4「そう思わない」)

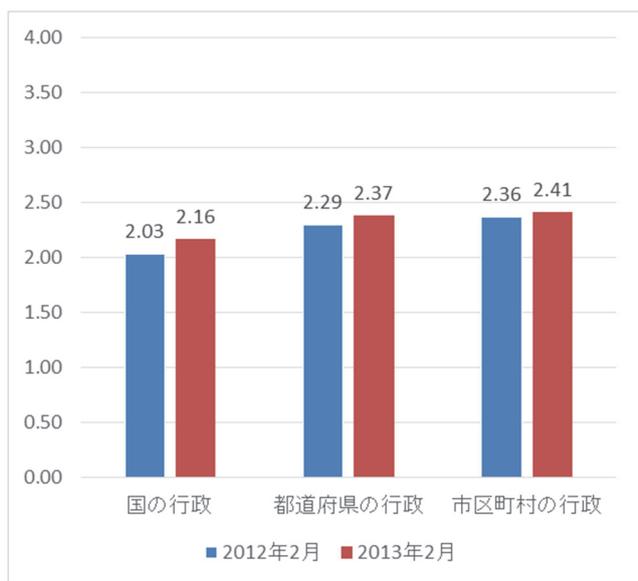


図 2.30 行政の公平性についての認識の変化

担当大臣・首長の能力

「行政の首長（各担当大臣）は、職務に関する十分な専門知識を持っている」「行政の首長（各担当大臣）は、職務に関する十分な専門的スキルを持っている」「行政の首長（各担当大臣）は、職務に関する十分な政策立案能力を持っている」（1「そう思う」～4「そう思わない」）

t値/p値	2011-2012
担当大臣	|t|(618) = 3.89, p<.001
都道府県の首長	|t|(612) = 1.11, n.s.
市区町村の首長	|t|(617) = 2.61, p<.01
t値/p値	2012-2013
担当大臣	|t|(805) = 9.85, p<.001
都道府県の首長	|t|(840) = 0.02, n.s.
市区町村の首長	|t|(845) = 0.91, n.s.

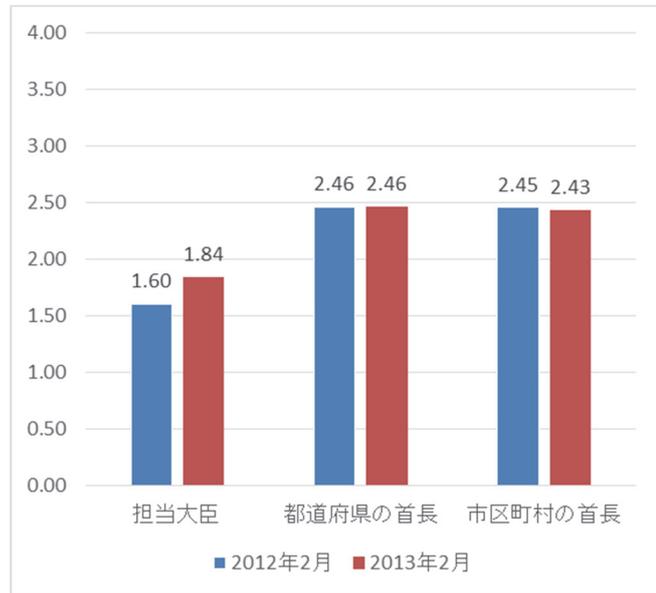
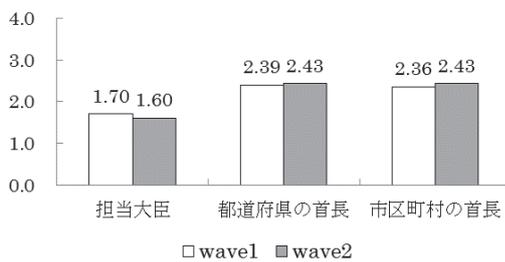


図 2.31 担当大臣・首長の能力についての認識の変化

行政職員の能力

「行政の職員は、職務に関する十分な専門知識を持っている」「行政の職員は、職務に関する十分な専門的スキルを持っている」「行政の職員は、職務に関する十分な政策立案能力を持っている」（1「そう思う」～4「そう思わない」）

t値/p値	2011-2012
国の職員	|t|(618) = 3.76, p<.001
都道府県の職員	|t|(612) = 1.23, n.s.
市区町村の職員	|t|(617) = 2.01, p<.05
t値/p値	2012-2013
国の職員	|t|(805) = 7.04, p<.001
都道府県の職員	|t|(840) = 2.93, p<.01
市区町村の職員	|t|(845) = 0.77, n.s.

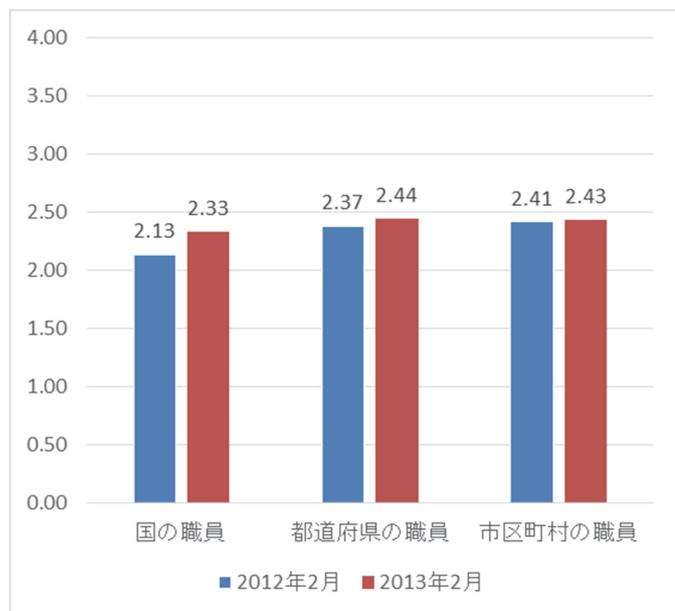
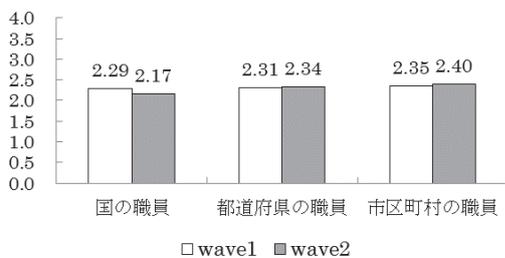


図 2.32 行政職員の能力についての認識の変化

行政の監視性（第一主成分の主構成要素）

「行政の仕事は法令に従い行われるため、職員の不正は難しい」「過去に起きた行政上の問題を教訓にして行政が改善されている」（1「そう思う」～4「そう思わない」）

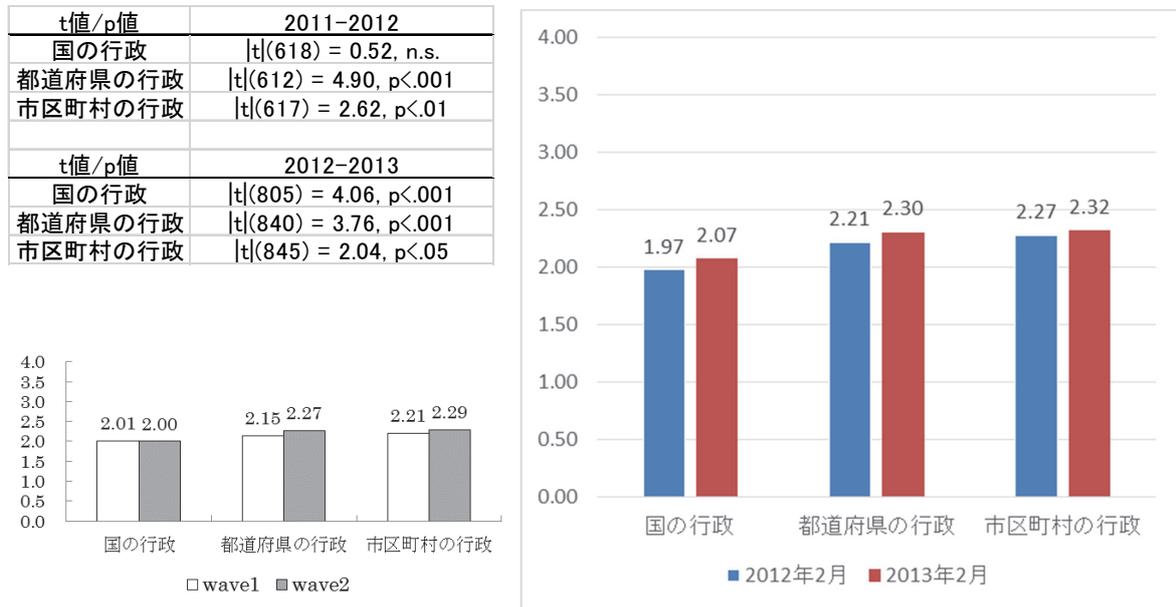


図 2.33 行政の監視性についての認識の変化（第一主成分の構成要素）

行政の監視性（第二主成分の主構成要素）

「行政に対する監視の目の届かないところが、たくさんある」「過去に起きた行政上の問題を教訓にして行政が改善されている」「行政が問題を起こしても、市民の側にはそれを見抜く情報が入手できない」「行政が問題を起こしても、市民の側にはそれを見抜く能力がない」（1「そう思う」～4「そう思わない」）

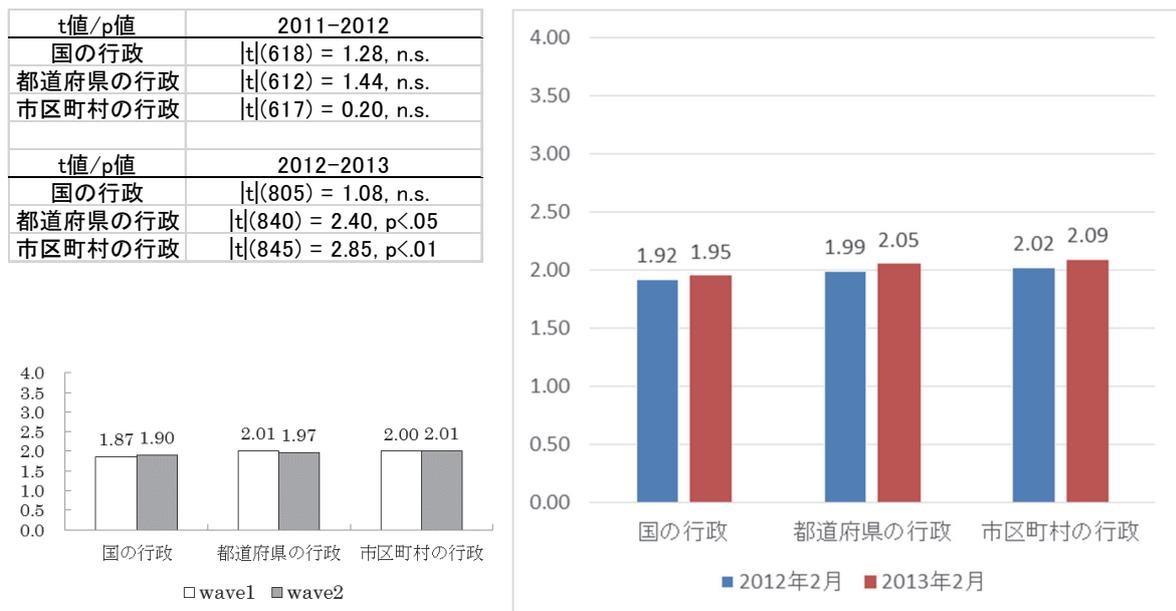


図 2.34 行政の監視性についての認識の変化（第二主成分の構成要素）

行政の透明性

「財務状況を適切に公表している」「人員削減の状況を適切に公表している」「行政に対する苦情処理の情報を適切に公開している」「行政の社会的責任の自己点検を適切に公表している」「コンプライアンス（法令順守）を適切に自己点検している」「問題発生時の情報提供を適切に行っている」（1「そう思う」～4「そう思わない」）

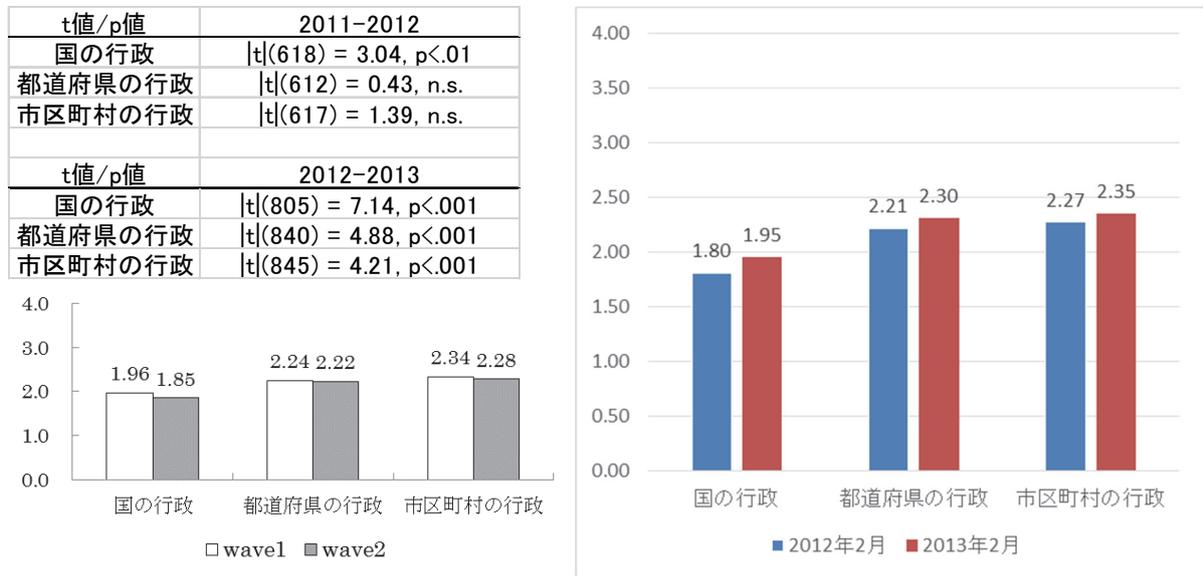


図 2.35 行政の透明性についての認識の変化

政治的効力感

「行政機関での手続きは、あまりにも複雑なので、自分にはよく理解できないことがある」「自分には行政のすることに対して、それを左右する力はない」「問題や苦情があるときでも、行政に行っても無駄だと思う」「行政の問題解決には、市民一人一人が行動を起こすことで、市民の声を反映させることができる（逆転項目）」「行政機関の職員は、大雑把に言って、市民のことを考えていないと思う」（1「そう思う」～4「そう思わない」）

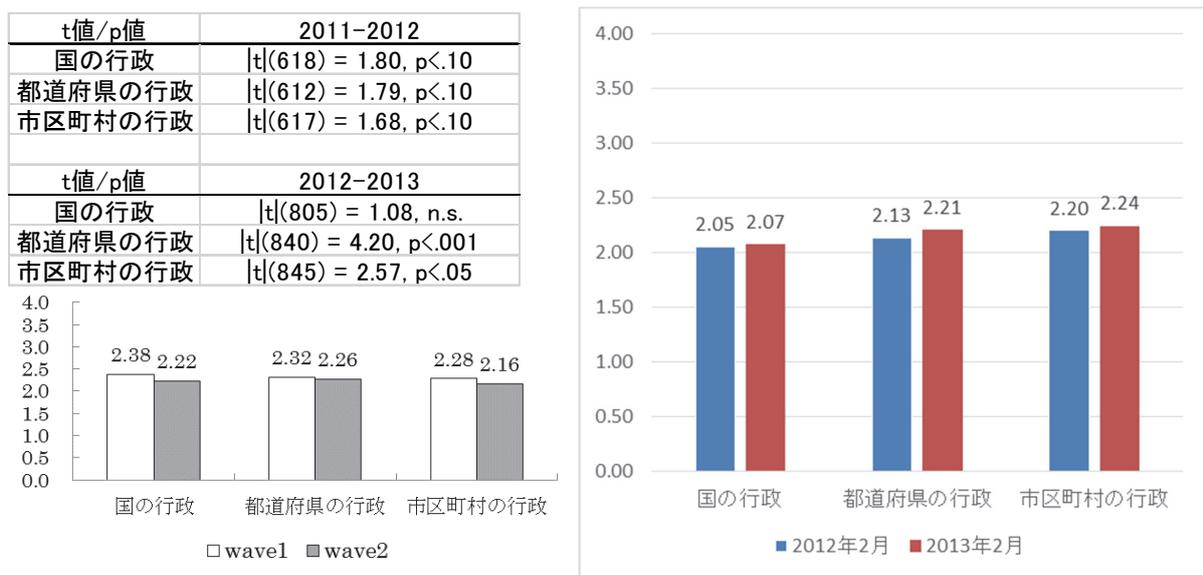
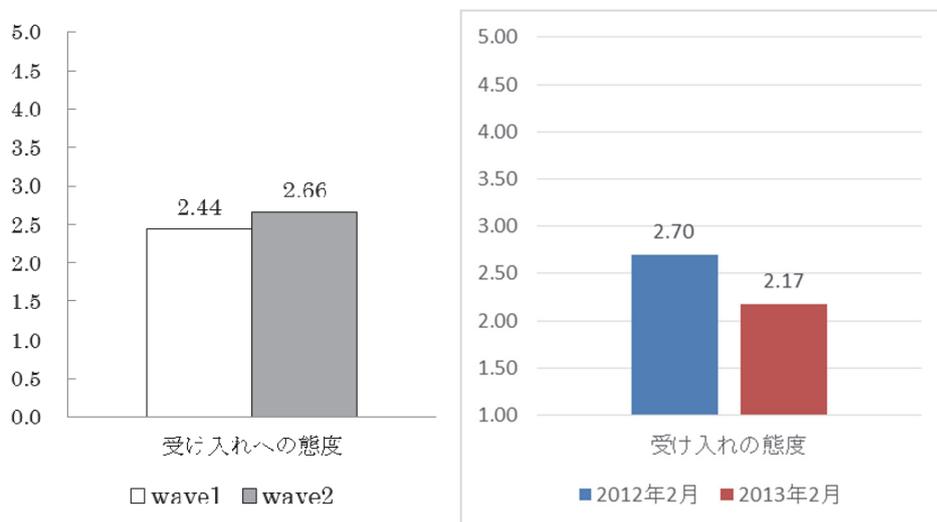


図 2.36 政治的効力感の変化

○放射性廃棄物処分場受け入れへの態度

「仮に、あなたのお住まいの自治体に高レベル放射性廃棄物の地層処分場が建設されると想定した場合、そのことについてどう思いますか。」(1「絶対に受け入れたくない」～5「受け入れても良い」)



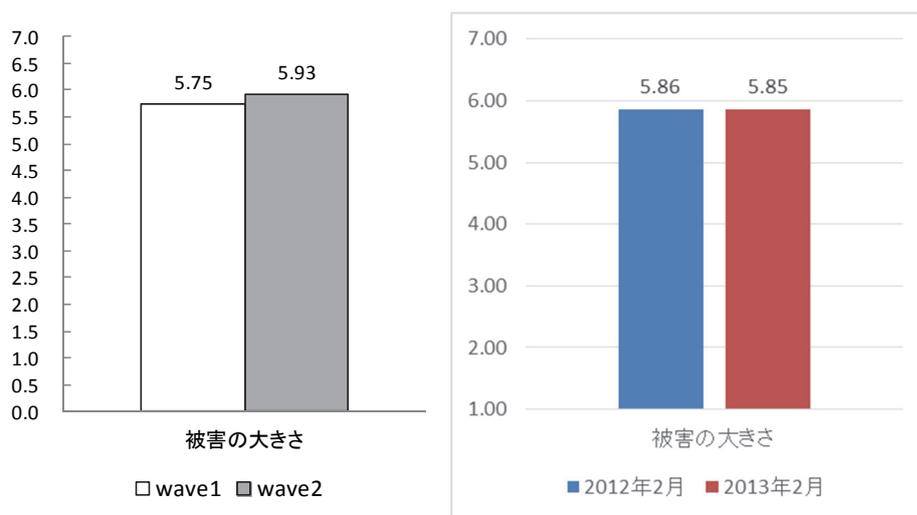
2011-2012: $|t|(1849)=7.90, p<.001$

2012-2013: $|t|(2494)=21.79, p<.001$

図 2.37 処分場受け入れへの態度の変化

○被害の大きさの見積もり

「高レベル放射性廃棄物の地層処分場において事故が発生したとしたら、その際に直接的・間接的に被害を受ける人は何人くらいいると思いますか。」「将来適切な処分方式が考案されるまで高レベル放射性廃棄物を貯蔵しておく中間貯蔵施設において事故が発生したとしたら、その際に直接的・間接的に被害を受ける人は何人いると思いますか。」(1「0人」～7「10万人以上」)



2011-2012: $|t|(1849)=4.65, p<0.001$

2012-2013: $|t|(2494)=0.36, n.s.$

図 2.38 被害の大きさの見積もりの変化

○被害の生起確率の見積もり

「高レベル放射性廃棄物の地層処分場の建設から 20 年以内に、放射能漏れなどの事故が起きる確率は何%ぐらいであると思いますか。」「高レベル放射性廃棄物の中間貯蔵施設の建設から 20 年以内に、放射能漏れなどの事故が起きる確率は何%ぐらいであると思いますか。」(1「0%」～11「100%」まで 10%刻みで測定)



2012-2013: $|t|(2494)=5.37, p<.001$

図 2.39 被害の生起確率の見積もりの変化

○原子力発電についての評価

「原子力発電は、他のエネルギーに比べて経済性に優れている」「原子力発電は、他のエネルギーに比べて環境に優しい」「原子力発電は、他のエネルギーに比べて安全性に優れている」(1「そう思う」～4「そう思わない」) ※下記のグラフでは指標を逆転させている。

t値/p値	2011-2012
経済性に優れる	$|t|(1849) = 16.38, p<.001$
環境に優しい	$|t|(1849) = 20.28, p<.01$
安全性に優れる	$|t|(1849) = 23.69, p<.001$
t値/p値	2012-2013
国の行政	$|t|(2494) = 2.06, p<.05$
都道府県の行政	$|t|(2494) = 1.62, n.s.$
市区町村の行政	$|t|(2494) = 2.47, p<.001$

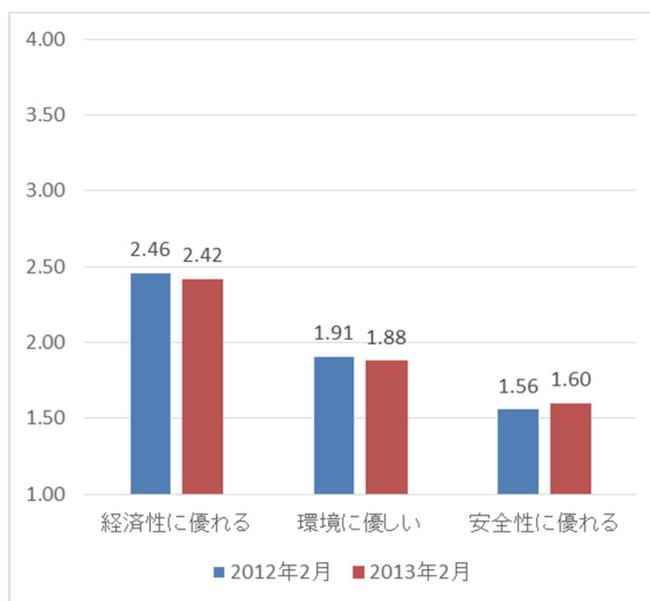
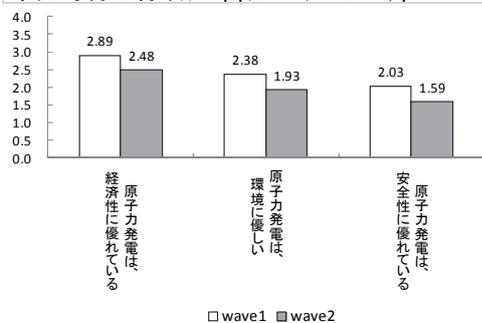


図 2.40 原子力発電についての評価の変化

【調査結果の含意と今後の分析の方向性】

「行政への信頼に関する項目」については、震災前後の比較において特に国レベルで顕著だった国レベルの行政への信頼の低下も含め、全体的に（復活および）上昇傾向にある。ただし、これらの変動のうち、震災を契機として発生している変動はどの程度のものなのか、（あるいは単に政権の交代や別の政策の実施状況等によっても形成される一般的な政治や行政に対する認識によって左右されているにすぎないのか）という点について検討するためには、数年の調査データを基に推論する必要があり、今後のパネルデータ調査の分析結果から明らかにすることになる。

原子力関連施設に関するリスクやメリットの認識や、原子力関連施設の受け入れ態度については、「行政への信頼に関する項目」に比べれば相対的にほかの要因の影響を受けにくいと考えられるため、記述統計の変化から原発事故の影響の変化を読み取ることができると考えられる。

原子力関連施設の受け入れ態度については、震災と事故の一年後に見られた有意な上昇から一転 2013 年には低下し、値としては震災前の水準よりも低くなっている。こうした態度の変化を理解するうえで、この間に起こった原子力に関する認識の変化に関する結果から、以下に示すような一つのロジックを仮説的に考えてみるができる。こうしたロジックの検証を、今後 2015 年調査データも踏まえたパネル分析と、より細かい分析を行うことによって明らかにしていく。

特に興味深いと思われるのは、原子力関連施設の事故リスクや、原子力発電のメリットに関する認識における、不均一な変化の傾向である。震災と事故の一年後の調査をその直前の調査結果と比較した際には、事故リスクに関しては発生した場合の被害の大きさに関して有意な上昇がみられ、原子力のメリットに関する認識は、一様に低下する傾向がみられた。こうした均一な原子力に対して批判的な方向への変化は、今回分析した震災と事故の二年後のデータと、一年後のデータの比較においては必ずしも見られない。例えば、原子力発電のメリットに関する認識については、その経済性に対する認識は引き続き有意な低下傾向を示している一方で、安全性に対する認識は、（行政への信頼と同様、）有意な回復傾向を示しているのである。

原子力関連施設の自己認識に関して、事故の生起確率に関しては、有意な認識の低下があり、先に述べたように、原子力発電の安全性に対する認識については、震災後の低下から一転、有意な上昇傾向がみられる。ここから、原子力関連施設の事故リスク、原子力発電のメリットに関する認識双方において、震災後より冷静に原子力が捉えられている部分が見て取れる。（この点に関連して、科学技術や科学技術者に対する信頼がどのように変化しているかが興味深いところであり、関連項目を 2015 年の調査に含めて実施する予定である。）

一方で、事故が起きた時の被害の大きさに関する認識に関しては、震災と事故の一年後の 2012 年に有意な上昇がみられた後、その二年後の 2013 年においても有意な低下はみられない。ここで、原子力発電の認識のうちその経済性に対する評価は引き続き有意な低下傾向を示していると述べたが、こうした被害の大きさに関する認識が事故の後更新され、それが定着したことが、これまで原子力発電のメリットの一つとして考えられてきた経済性の評価の継続的な低下につながったものとも考えられる。この点において、生起確率という意味での事故リスクや、原子力発電の一般的な安全性については「震災・事故後」の影響は小さくなったことは、受け入れ態度に代表されるような原子力関連施設への認識の回復には結びついていない。

2.3. 平成 26 年度末（2015 年 3 月）の調査設計

調査の設計

本研究では、web アンケートを用いて、一般市民の放射性廃棄物・原子力発電所に対する態度および行政・科学技術に対する信頼を測定した。本研究では、2011 年 2 月～2013 年 2 月にかけて行われた計 3 回の調査の継続調査として、過去の調査参加者への追跡調査が行われた。以下では、過去の調査の概要について簡単に説明する。

2011 年調査

ベースとなる 2011 年調査においては、株式会社クロス・マーケティングが保有する約 170 万人の Web アンケートモニターの中から、合計で 3,360 名の一般市民の回答を得た。調査の回答者の基本的属性（性別、年齢層）は以下のとおりであった。

2011 年調査回答者の基本的属性

	20～29歳	30～39歳	40～49歳	50～59歳	60～69歳	計
男性	214	397	508	349	254	1722
女性	315	512	383	258	170	1638
計	529	909	891	607	424	3360

加えて、本調査では原子力発電所関連施設が設置されている地域とそれ以外の地域から半数ずつ回答者を抽出した。原子力関連施設が設置されている地域の内訳は下記のとおりであった。

2011 年調査における原子力発電所関連施設を有する地域の内訳

市町村名	人数
北海道古宇郡泊村	8
青森県下北郡東通村	4
宮城県牡鹿郡女川町	12
宮城県石巻市	273
福島県双葉郡大熊町	23
福島県双葉郡楢葉町	18
茨城県那珂郡東海村	122
新潟県柏崎市	233
新潟県刈羽郡刈羽村	4
石川県羽咋郡志賀町	26
福井県敦賀市	200
福井県三方郡美浜町	17
福井県大飯郡高浜町	26
福井県大飯郡おおい町	27
静岡県御前崎市	50
島根県松江市	512
愛媛県西宇和郡伊方町	9
佐賀県東松浦郡玄海町	5
鹿児島県薩摩川内市	111
合計	1680

2012 年調査

2012 年調査においては、1,850 名の継続回答者と 2,150 名の新規回答者から回答を得た。それぞれの属性は以下のとおりであった。

2012 年調査回答者の基本的属性

		20～29歳	30～39歳	40～49歳	50～59歳	60～69歳	計
2011年からの 継続回答者	男性	79	185	271	228	190	953
	女性	120	251	236	171	119	897
	小計	199	436	507	399	309	1850
新規回答者	男性	190	184	251	276	260	1161
	女性	204	192	175	224	194	989
	小計	394	376	426	500	454	2150
合計		593	812	933	899	763	4000

2013 年調査

2013 年調査においては、2011 年調査と 2012 年調査の両方に回答した回答者（1,138 名）および、2012 年調査のみに回答した回答者（1,357 名）を対象に再度 web アンケート調査を行った。加えて、新規の回答者として 2,705 名の男女を新たに調査対象とした。2013 年調査の回答者の基本属性は下記のとおりである。

2013 年調査回答者の基本的属性

		20～29歳	30～39歳	40～49歳	50～59歳	60～69歳	計
3波すべてに 回答	男性	44	89	163	166	167	629
	女性	48	117	127	123	94	509
	小計	92	206	290	289	261	1138
2波(2012年と 2013年)のみ に回答	男性	65	111	175	216	198	765
	女性	62	126	125	145	134	592
	小計	127	237	300	361	332	1357
新規回答者	男性	209	317	294	289	214	1323
	女性	280	330	303	265	204	1382
	小計	489	647	597	554	418	2705
合計		708	1090	1187	1204	1011	5200

2015 年調査

本研究においては、2013 年調査の回答者のうち、過去の 3 波の調査全てに回答した方々を優先的に抽出し、放射性廃棄物、原子力発電所、行政への信頼といった諸種の心理社会的態度を測定した。本研究は、人々のこれらの心理社会的態度が、震災から 4 年を経てどのように変化しているのかを調査することが目的である。

調査回答者は最大で 1,450 名になるように収集し、3 波全てへの回答者でその人数に満たない場合には、次いで 2011 年調査への回答者を優先的に追跡し、目標人数に達するように回答者を募った。本年度調査の質問項目を以下に記載する。

行政の信頼と原発の放射性廃棄物に関するアンケート

平成27年3月

あいさつ文

近年、原子力発電所が排出する放射性廃棄物の処分について、国としての対策が検討されています。この放射性廃棄物に関する問題は現在、「高レベル放射性廃棄物の地層処分」問題と呼ばれています。この問題について東京大学では工学部・小松崎講師を中心に、その学術的・社会的な意味を検討する研究会を進めてまいりました。

皆様には以前に行政への信頼や当該事業に関する態度・意識についてご意見をいただきましたが、その後も原子力発電や放射性廃棄物に関する政治的、社会的状況は変化しつづけています。本年は、そのような状況にともなう人々の態度の変化を捉えるために、以前にご回答いただいた方々に再度ご意見をうかがうものとなっております。

なお、このアンケート調査票への回答にかかる時間はおよそ30分です。

本調査は純粋に学術的なもので、皆様の回答はすべてコンピュータによって統計的に処理されるため、一人一人のご回答を個別に分析するようなことは決してございません。また、皆様のご回答が外部に漏れたり、その他の目的に使用されたりするようなことは絶対にございませ

ん。

ご多忙中、はなはだ勝手なお願いをいたしまして、まことに恐縮でございますが、何卒私どもの研究の趣旨にご理解をいただき、お力添えいただけますよう重ねてお願い申し上げます。

【SC1】 あなたの性別に○をつけてください。

1 男性	2 女性
------	------

【SC2_1】 あなたの年齢をお答えください。

	歳
--	---

【SC3_SQ2_1】 あなたは現在の地区に合計で何年お住まいですか。

	年くらい
--	------

はじめに、国の行政機関への態度についておうかがいいたします

【問 1】 あなたは、国の行政機関はどの程度信頼できると思いますか。あてはまる数字ひとつに○をつけてください。

1 信頼できる	3 あまり信頼できない
2 やや信頼できる	4 全く信頼できない

【問 2】 国の行政機関の職員に関する以下の文章について、あなたはどのように思われますか。あてはまる数字にひとつずつ○をつけてください

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
(1) 公務員としての誇りを持っている	..... 1	2	3	4
(2) 職員として安心できる人が働いている	..... 1	2	3	4

【問 3】 国の行政機関の公平性について、あなたはどのように思われますか。あてはまる数字にひとつずつ○をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
(1) 行政はあなたの地域の人たちを公平に扱っている	..... 1	2	3	4
(2) 行政はあなたのことを公平に扱っている	..... 1	2	3	4

【問 4】国の行政機関の各大臣や職員の能力・知識について、あなたはどのように思われますか。

あてはまる数字に**ひとつずつ〇**をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
(1) 各担当大臣は、職務に関する十分な専門知識を持っている	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(2) 国の行政機関の職員は、職務に関する十分な専門知識を持っている	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4

【問 5】国の行政機関の不正防止・監視に関する以下の文章について、あなたはどのように思われますか。

あてはまる数字に**ひとつずつ〇**をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
(1) 行政に対する監視の目の届かないところが、たくさんある	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(2) 行政が問題を起こしても、市民の側にはそれを見抜く情報が入手できない	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4

【問 6】国の行政機関の透明性について、あなたはどのように思われますか。

あてはまる数字に**ひとつずつ〇**をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
(1) 行政に対する苦情処理の情報を適切に公開している	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(2) 行政の社会的責任の自己点検を適切に公表している	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4

【問 7】国の行政機関に関する以下の文章について、あなたはどのように思われますか。

あてはまる数字に**ひとつずつ〇**をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
(1) 行政機関での手続きは、あまりに複雑なので、自分にはよく理解できないことがある	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(2) 自分には行政のすることに対して、それを左右する力はない	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(3) 問題や苦情があるときでも、行政に言っても無駄だと思う	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4

次に、科学技術への態度についておうかがいたします

【問 8】 あなたは、科学者の話は信頼できると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 信頼できる	3 あまり信頼できない
2 やや信頼できる	4 全く信頼できない

【問 9】 あなたは、技術者の話は信頼できると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 信頼できる	3 あまり信頼できない
2 やや信頼できる	4 全く信頼できない

【問 10】 あなたは、学会等の専門家集団は信頼できると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 信頼できる	3 あまり信頼できない
2 やや信頼できる	4 全く信頼できない

【問 11】 あなたは、社会の新たな問題はさらなる科学技術の発展によって解決されると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 そう思う	3 あまりそう思わない
2 ややそう思う	4 全くそう思わない

【問 12】 あなたは、日本の科学技術は諸外国に比べ信頼できると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 信頼できる	3 あまり信頼できない
2 やや信頼できる	4 全く信頼できない

【問 13】 あなたは、行政の政策が科学技術の専門家の意見で決まるのはよいことだとおもいますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 よいことだと思う	3 どちらかといえばよいことだと思わない
2 どちらかといえばよいことだと思う	4 よいことだと思わない

【問 14】 2012年に発足された原子力規制委員会による原子力発電の規制・監視の厳格化に、あなたはどの程度期待していますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 とても期待している	4 全く期待していない
2 やや期待している	5 原子力規制委員会について知らなかった
3 あまり期待していない	

次に、あなたのふだんの政治や原子力政策への関心についておうかがい

いたします

【問 16】 あなたはふだん、政治上の出来事にどれくらい注意を払っていますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 いつも注意を払っている	3 あまり注意を払っていない
2 時々注意を払っている	4 全く注意を払っていない

【問 17】 あなたはふだん、原子力発電に関する報道にどれくらい注意を払っていますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 いつも注意を払っている	3 あまり注意を払っていない
2 時々注意を払っている	4 全く注意を払っていない

【問 18】 あなたはふだん友人、家族、同僚と政治についてどれくらい話すことがありますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 頻繁にある	3 ごくまれにある
2 たまにある	4 ほとんどない

【問 19】 あなたはふだん友人、家族、同僚と原子力発電についてどれくらい話すことがありますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 頻繁にある	3 ごくまれにある
2 たまにある	4 ほとんどない

【問 20】 ふだんあなたは何党を支持していますか（ひとつに○）。

1 自民党	5 共産党	9 支持政党なし
2 民主党	6 次世代の党	
3 公明党	7 社民党	
4 維新の党	8 その他の政党	

【問 21】 あなたは、原子力発電に関する以下の事柄について、どのくらいよく知っていますか。
あてはまる数字に**ひとつずつ○**をつけてください。

	人に説明 できる	よく知っ ている	聞いたこと はある	まったく 知らない
(1) 高レベル放射性廃棄物	..... 1	2	3	4
(2) 使用済み核燃料	..... 1	2	3	4
(3) 中間貯蔵	..... 1	2	3	4
(4) 核燃料プール	..... 1	2	3	4
(5) 核燃料の再処理	..... 1	2	3	4
(6) 地層処分	..... 1	2	3	4

以下の文章を読み、続く設問にお答えください

原子力発電所からは発電に伴って放射性廃棄物が必ず発生しています。今後の原子力発電政策のあり方については不透明なところがあるものの、少なくともこの廃棄物の処理問題は避けて通れません。

このような原子力発電の利用に伴い発生する**高レベル放射性廃棄物**は、原子力発電所で使用した燃料からウラン・プルトニウムを分離・回収した後に残る液状の廃棄物です。

日本では、**地層処分**によってこの**高レベル放射性廃棄物**に対応する方針となっています。**地層処分**とは地下 300m を超える深さの地層中に数万年以上の期間閉じ込めるというもので、現時点で最も問題点が少なく、実現可能な手法として世界各国で採用されている方法です。

この処分施設立地に向けて、日本では、まず過去の地震等の自然現象に関する文献・資料や、航空写真などの資料に基づいて調査を行う**文献調査**、ボーリング調査等を行う**概要調査**、地下施設における**精密調査**という 3 段階のプロセスを経て、最終的に日本全国から 1 カ所の自治体（市町村または都区部）を処分施設立地地域として選定することが法律で定められています。

最初の**文献調査**が実施される自治体と都道府県には、地域振興対策費等として、調査期間合計で**20 億円が交付**されます。また**概要調査**に進んだ場合には、調査期間の合計で最大 **70 億円が交付**

されます。**精密調査**、建設、操業に伴う交付金額やその期間については、現在、制度化が進められている状態です。

現在は、全国の市町村に対して第一段階となる**文献調査**に関する公募が実施されている段階です。

【問 22】あなたのお住まいの自治体が高レベル放射性廃棄物処分事業の調査に応募すると想定した場合、あなたは以下のような感情をどの程度感じますか。あてはまる数字に**ひとつずつ**○をつけてください。

	強く感じる	やや感じる	あまり感じない	全く感じない
(1) 不安	..... 1	2	3	4
(2) 怒り	..... 1	2	3	4
(3) 恐怖	..... 1	2	3	4
(4) 満足	..... 1	2	3	4
(5) 希望	..... 1	2	3	4

【問 23】あなたのお住まいの自治体が高レベル放射性廃棄物処分事業の調査に応募すると想定した場合、それに伴って交付金を受け取ることは当然のことだと思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 当然である	3 どちらかといえば疑問である
2 どちらかといえば当然である	4 疑問である

【問 24】高レベル放射性廃棄物処分事業への応募に伴う交付金は、どの程度の範囲までの住人に支払われるべきだと思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 受け入れ自治体のみ	3 受け入れ自治体が所属する都道府県全体
2 隣接する自治体まで	4 隣接する他の都道府県の自治体も含むべき

【問 25】高レベル放射性廃棄物処分事業への応募に伴う交付金に関する以下の文章について、あなたはどのように思われますか。あてはまる数字に**ひとつずつ○**をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	全くそう 思わない
(1) 応募に伴う交付金によって、自治体が発展する	..... 1	2	3	4
(2) 応募に伴う交付金によって、住民ひとりひとりの生活が向上する	..... 1	2	3	4
(3) 応募に伴う交付金は、地域発展のために適切に利用される	..... 1	2	3	4

【問 26】高レベル放射性廃棄物の地層処分場において事故が発生したとしたら、その際に直接的・間接的に被害を受ける人は何人いると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 0人	4 100～1000人未満	7 10万人以上
2 1～9人	5 1000～1万人未満	
3 10～99人	6 1万～10万人未満	

【問 27】高レベル放射性廃棄物の地層処分場の建設から20年以内に、放射能漏れなどの事故が起きる確率は何%ぐらいあると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 0%	5 40%	9 80%
2 10%	6 50%	10 90%
3 20%	7 60%	11 100%
4 30%	8 70%	

【問 28】仮に、あなたのお住まいの自治体に高レベル放射性廃棄物の地層処分場が建設されると想定した場合、そのことについてどう思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 絶対に受け入れたくない	4 どちらかといえば受け入れてもよい
2 どちらかといえば受け入れたくない	5 受け入れてもよい
3 どちらともいえない	

【問 29】 あなたは、日本で生じた高レベル放射性廃棄物を国内で処分すべきだと思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 国内で処分すべき	4 どちらかといえば国外で処分すべき
2 どちらかといえば国内で処分すべき	5 国外で処分すべき
3 どちらともいえない	

【問 30】 高レベル放射性廃棄物処分に関して国や自治体が勉強会を開催するとしたら、あなたは参加したいと思いますか。

1 ぜひ参加したい	4 どちらかといえば参加したくない
2 どちらかといえば参加したい	5 全く参加したくない
3 どちらともいえない	

【問 31】 高レベル放射性廃棄物処分場問題の解決に向けて、あなたは以下の各行政にどの程度期待していますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

	とても期待している	やや期待している	あまり期待していない	全く期待していない
(1) 国の行政機関	..... 1	2	3	4
(2) お住まいの都道府県の行政機関	..... 1	2	3	4
(3) お住まいの市区町村の行政機関	..... 1	2	3	4

【問 32】 高レベル放射性廃棄物の処分が必要な理由として、あなたが考えるものは以下のどれですか。あてはまるもの**すべてに○**をつけてください。

1 原子力エネルギーを活用して経済成長してきたことに対する責任	4 国際的な責任を果たすため
2 未来の世代に負担を残さないため	5 交付金による地域活性化のため
3 原子力発電所に使用済み核燃料を放置しないため	6 今後も原子力発電を続けていくため
	7 あてはまるものはない
	8 高レベル放射性廃棄物の処分は必要ではない

次に、原子力発電に対する態度についておうかがいたします

【問 33】 ある人々は日本のエネルギー問題を解決するため原子力発電を増やすべきだと言っています。あなたはこれに賛成ですか反対ですか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1 賛成	3 どちらかといえば反対
2 どちらかといえば賛成	4 反対

【問 34】原子力発電に関する以下の文章について、あなたはどのように思われますか。あてはまる数字に**ひとつずつ〇**をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	全くそう 思わない
(1) 原子力発電は、他のエネルギーに比べて経済性に優れている	..... 1	2	3	4
(2) 原子力発電は、他のエネルギーに比べて環境に優しい	..... 1	2	3	4
(3) 原子力発電は、他のエネルギーに比べて安全性に優れている	..... 1	2	3	4

【問 35】この先 20 年くらいを考えた場合、あなたが一番期待しているエネルギーを次の中から**二つ**選んでください。

1 火力	4 風力	7 水力
2 原子力	5 太陽光	8 特になし
3 潮力（海洋発電）	6 地熱	

【問 36】原子力発電政策と高レベル放射性廃棄物処分場問題の関連について、あなたはどのように思われますか。あてはまる数字に**ひとつずつ〇**をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
(1) 原子力発電政策と高レベル放射性廃棄物処分場問題はそれぞれ別個の問題として考えるべきだ	..... 1	2	3	4
(2) 脱原発政策が推進されれば、おのずと高レベル放射性廃棄物処分場問題は解決する	..... 1	2	3	4
(3) 高レベル放射性廃棄物処分場問題を解決するためには、現在の原子力発電政策を維持することが重要だ	..... 1	2	3	4
(4) これまでの原子力発電政策を維持するためには、高レベル放射性廃棄物処分場問題を解決することが重要だ	..... 1	2	3	4

【問 37】今後、国内の原子力発電所で、再び大規模な事故が起きる可能性はどの程度あると思いますか。あてはまる数字**ひとつに〇**をつけてください。

1 可能性は高い	3 どちらかというとも可能性は低い
2 どちらかというとも可能性は高い	4 可能性は低い

【問 38】 今後、国内の原子力発電所で再び大規模な事故が起きたとしたら、あなたやあなたの家族が、大規模・広範囲・長期の避難を強いられる可能性はどの程度あると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1	可能性は高い	3	どちらかという可能性は低い
2	どちらかという可能性は高い	4	可能性は低い

【問 39】 あなたのお住まいの地域で、今後数年内に震度 6 を越えるような大きな地震が起きる可能性はどの程度あると思いますか。あてはまる数字**ひとつに○**をつけてください。

1	可能性は高い	3	どちらかという可能性は低い
2	どちらかという可能性は高い	4	可能性は低い

【問 40】 今後 20 年以内に、日本は原子力発電を抑制する決定を下すようになると思いますか。

1. はい 2. いいえ 3. わからない

—それはなぜですか（100 文字以内でお答えください）。

次に、ふだんのご意見についておうかがいいたします

【問 41】 国の諸制度に関する以下の文章について、あなたはどのように思われますか。あてはまる数字に**ひとつずつ○**をつけてください。

	そう思う	やや そう思う	あまりそう 思わない	そう 思わない
(1) 放射性廃棄物処分事業に関する制度は、制度的枠組みとしては安心できない。	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(2) 年金制度は制度的枠組みとしては安心できない。	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(3) 建築確認制度は制度として安心できない。	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(4) 輸入食肉検査制度は制度として安心できない。	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4

【問 42】以下のクイズについて、それぞれあなたが正しいと思う番号ひとつに○をつけてください。

※ 下記のクイズは、あまり知られていない事実も含めてお尋ねするものです。わからない場合にも回答を調べていただく必要はなく、「わからない」とお答えください。

(ア) 日本の首相になれる条件は、以下のうちどれですか。

1 衆議院議員でなくてはならない	3 国会議員でなくてもなれる
2 衆議院議員でなくても国会議員であればなれる	4 わからない

(イ) 現在の衆議院の選挙制度の名称は、以下のうちどれですか。

1 中選挙区制	3 小選挙区比例代表併用制
2 小選挙区比例代表並立制	4 わからない

【問 43】あなたはふだん、下記のものを見たり読んだりすることがどれくらいありますか。あてはまる数字にひとつずつ○をつけてください。

	よくある	ときどきある	あまりない	ほとんどない
(1) テレビのニュース番組（ワイドショーや情報バラエティ番組は除く）	..... 1	2	3	4
(2) テレビの討論番組	..... 1	2	3	4
(3) テレビのワイドショー・情報バラエティ番組	..... 1	2	3	4
(4) 新聞・雑誌	..... 1	2	3	4
(5) インターネット	..... 1	2	3	4

【問 44】あなたはふだん、下記のものからどれくらい影響を受けていると思いますか。あてはまる数字にひとつずつ○をつけてください。

	かなり影響を受けている	何らかの影響を受けている	あまり影響を受けていない	ほとんど影響を受けていない
(1) テレビのニュース番組（ワイドショーや情報バラエティ番組は除く）	..... 1	2	3	4
(2) テレビの討論番組	..... 1	2	3	4
(3) テレビのワイドショー・情報バラエティ番組	..... 1	2	3	4
(4) 新聞・雑誌	..... 1	2	3	4
(5) インターネット	..... 1	2	3	4

【問 45】 私たちの社会生活はいつも平穏というわけではありません。次のような意見について、あなたはどのように思いますか。あてはまる数字に**ひとつずつ〇**をつけてください。

	強く賛成	どちらかといえば賛成	どちらかといえば反対	強く反対
(1) 近所の人と“いさかい”があったときは、その相手の意向を汲んであげるのが一番よい	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(2) 職場の同僚たちが反対するのであれば、自分の意見に固執するべきではない	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(3) 家族のためには、自分の個人的利害は二の次にすべきだ	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4
(4) 国家や社会のためには、人は個人的利益を犠牲にして献身する覚悟をすべきだ	..... 1	..... 2	..... 3	..... 4

最後にあなたご自身のことについて、いくつかおうかがいいたします

【問 46】 あなたが最後に在籍した、または現在在学中の学校は次のどれですか（〇はひとつ）。

1 小学校	5 大学
2 中学校（旧制尋常小学校、旧制高等小学校を含む）	6 大学院
3 高校（旧制中学校、実業学校、師範学校、女学校を含む）	7 上記にあてはまるものはない
4 短大・高専、専門学校、旧制高校	

【問 47】 あなたは結婚されていますか（〇はひとつ）。

1 未婚	4 結婚しており子供がいるが独立している
2 結婚しているが子供はいない	5 その他
3 結婚しており一緒に住んでいる子供がいる	

【問 48】 去年（平成 26 年 1 月～12 月）1 年間のお宅の収入はご家族全部あわせると、およそど

のくらいになりますか。ボーナスや臨時収入を含め、税込みでお答えください（〇はひとつ）。

1	200万円未満	8	800万円～1000万円未満
2	200万円～300万円未満	9	1000万円～1200万円未満
3	300万円～400万円未満	10	1200万円～1400万円未満
4	400万円～500万円未満	11	1400万円～2000万円未満
5	500万円～600万円未満	12	2000万円以上
6	600万円～700万円未満	13	答えたくない
7	700万円～800万円未満		

【問 49】 あなたの現在のお仕事についておうかがいたします。あなたはふだんどのような仕事をなさっていますか。あてはまる数字**ひとつ**に〇をつけてください。

1	フルタイムで働いている	
2	パートタイム・アルバイト	
3	学生・生徒	} → 「3」「4」「5」「6」と回答された方はここで質問は終わりです ありがとうございました
4	専業主婦	
5	その他	
6	無職	

「1」「2」のいずれかに該当する人は**【問 50】**にお答えください

【問 50】 それでは、あなたの現在のお仕事について、最もその内容に近い数字**ひとつ**に〇をつけてください。

1	会社団体役員・管理職（会社・団体などの課長以上、管理的公務員など）
2	事務職（一般事務系・課長以下、記者、編集者など）
3	販売・サービス職（販売員、セールスマン、理容師・美容師、調理師など）
4	技能・労務・保安職（職人、工員、自動車運転手、警察官など）
5	専門技術職（医師、弁護士、教員、技術者、看護婦）
6	自営業主や自由業（商店主、工場主、デザイナー、職業スポーツ選手など）
7	農林漁業
8	その他（具体的に _____ ）

長い間のご協力、誠にありがとうございました。

このアンケートに関して、ご意見、ご批判、ご感想などございましたら、
この欄にご自由にお書きください。

【参考文献】

- Baumgartner, Frank R., and Bryan D. Jones. (2009). *Agendas and Instability in American Politics*.
- Birkland, Thomas A. (2007). *Agendas Setting in Public Policy*.
- Cobb, Roger W. and Elder, Charles D. (1971). *The Politics of Agenda-Building: An Alternative Perspective for Modern Democratic Theory*.
- Dearing, James W. and Everett M. Rogers. (1996). *Agenda-Setting: Communication Concepts*.
- Hall, Peter A. (1993). *Policy Paradigms, Social Learning, and the State: The Case of Economic Policymaking in Britain*.
- Immergut, Ellen M. (1992). *The Rule of the Game: The Logic of Health Policy-Making in France, Switzerland, and Sweden*.
- Kingdon, John W. (1995) *Agendas, Alternatives, and Public Policies*.
- McCombs, Maxwell. (2014). *Setting the Agenda: Mass Media and Public Opinion*.
- Rudig, Wolfgang. (1990). *Anti-Nuclear Movements: A World Survey of Opposition to Nuclear Energy*.
- SPD und Grune. (1998). *Aufbruch und Erneuerung – Deutschlands Weg ins 21. Jahrhundert. Koalitionsvereinbarung zwischen SPD und Bündnis 90/Die Grünen*.
- Stone, Deborah A. (1989). *Causal Stories and the Formation of Policy Agendas*.
- Strandberg, Urban and Mats André. (2012). *Nuclear Waste Management in a Globalised World*.
- Timmermans, Arco (2001). *Arenas as Institutional Sites for Policymaking: Patterns and Effects in Comparative Perspective*
- Tosun, Jale, Sophie Biesenbender, and Kai Schulze. (2015). *Energy Policy Making in the EU: Building the Agenda*.
- 井口泰 (1997) 『国際的な人の移動と労働市場』 日本労働研究機構
- 池上直己 (2009) 『ゼミナール 疲弊する地域医療』 日本経済新聞社
- 池田謙一 (2007) 『政治のリアリティと社会心理：平成小泉政治のダイナミックス』 木鐸社
- アンジェロ・イシ (2006) 『変わりゆく社会と人権』 御茶の水書房
- 稲上毅・桑原靖夫・国民金融公庫総合研究所編 (1992) 『外国人労働者を戦力化する中小企業』 中小企業リサーチセンター
- 今城光英 (1999) 『鉄道改革の国際比較』 日本経済評論社
- 植田浩史 (2004) 『現代日本の中小企業』 岩波書店
- クリスチャン・ウルマー (2002) 『折れたレール—イギリス国鉄民営化の失敗』 ウェッジ
- イエスタ・エスピン—アンデルセン (2001) 『福祉資本主義の三つの世界』 ミネルヴァ書房
- 大下英治 (2005) 『郵政大乱！ 小泉魔術』 徳間書店
- 大竹文雄・大日康史 (1993) 「外国人労働者と日本人労働者の代替・補完関係」『日本労働研究雑誌』 No.407。

- 大嶽秀夫 (2006) 『小泉純一郎 ポピュリズムの研究』 東洋経済新報社
- 尾形隆彰 (1991) 『東京都における外国人労働者の実態』 東京都立労働研究所
- 小川道雄 (2008) 『医療崩壊か再生か－問われる国民の選択』 日本放送出版協会
- 小倉慶久 (2012) 「裁判員制度の誕生 (1) -アジェンダ・セッティングと政策形成-」
<http://kuir.jm.kansai-u.ac.jp/dspace/bitstream/10112/7702/1/KU-1100-20120930-06.pdf>
- 小野一 (2014) 「連立と競争：ドイツ」『脱原発の比較政治学』 法政大学出版局
- 外国人集住都市会議 (2013) 『ながはま報告書』 <http://www.shujutoshi.jp/2013/index.htm>
- 梶田孝道 (1998) 「日本の外国人労働者政策－政策意図と現実の乖離という視点から」『国際化する日本社会』 東京大学出版会
- 上川龍之進 (2014) 『日本銀行と政治』 中央公論新社
- 上川龍之進 (2005) 『平成バブル－先送りの研究』 東洋経済新報社
- 毛塚和彰・駒井洋・小野五郎・尾形隆彰 (1992) 『外国人労働者の就労実態』 明石書房。
- 小泉純一郎 (1996) 『官僚王国解体論』 光文社
- 駒井洋 (2002) 『国際化の中の移民政策の課題』 明石書店
- 小松崎俊作 (2012) 「新医師臨床研修制度の多元的評価」(未公刊)
- 厚生労働省 (2002) 「新たな医師臨床研修制度の在り方について (案)」
<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/isei/rinsyo/keii/021022.html>
- 厚生労働省 (2012) 「医師・歯科医師・薬剤師調査」
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/ishi/12/index.html>
- 厚生労働省医政局 (2006) 「「医師の需給に関する検討会報告書」の公表について」
<http://www.mhlw.go.jp/shingi/2006/07/s0728-9.html>
- 鴻巣圭一 (2013) 「ゆとり教育導入期の政治過程分析－教育政治の三極モデルを用いたアクターの動向の整理」
<http://www.soc.hit-u.ac.jp/~takujit/course-of-faculty/dissertation/2013/konosu2013.pdf>
- 近藤則夫 (2012) 『現代インドの国際関係－メジャー・パワーへの模索』 アジア経済研究所
- 西郷貴洋 (2009) 「高知県東陽町における高レベル放射性廃棄物処分地決定に係る政治過程分析」(東京大学大学院工学系研究科 修士論文)
- 酒井恵真・湯本誠 (2001) 『日系ブラジル人の定住化と地域社会－群馬県太田・大泉地区を事例として』 御茶の水書房
- 坂中英徳 (2005) 『入管戦記』 講談社
- 産業競争力会議 (2014) 「成長戦略進化のための今後の検討方針」
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/housin_honbun_140120.pdf
- 柴田義松 (1999) 『新学習指導要領の読みかた－“自ら学び、自ら考える力”のゆくえを問う』 あゆみ出版
- 清水功哉 (2004) 『日銀はこうして金融政策を決めている－記者が見た政策決定の現場』 日本経済新聞出版社
- ジョッパ, レオナルド (2005) 『日本の教育政策過程 1970～80年代教育改革の政治システム』

三省堂

杉野剛 (2009) 「医師要請・確保の現状と課題」

<http://medicalfinder.jp/doi/pdf/10.11477/mf.1541101589>

高田亮爾 (2003) 『現代中小企業の経済分析－理論と構造』 ミネルバ書房

高田亮爾 (2010) 「中小企業政策の歴史と課題 (2)」

<http://www.umds.ac.jp/kiyou/r/R22-2/037-050takada.pdf>

竹内敬二 (2013) 『電力の社会史 何が東京電力を生んだのか』 朝日新聞出版

田中隆之 (2008) 『「失われた十五年」と金融政策－日銀は何を行い何を行わなかったか』

日本経済新聞出版社

田中宏樹 (2006) 『「小泉改革」とは何だったのか』 日本評論社

丹野清人 (1999) 「在日ブラジル人の労働市場」『大原社会問題研究所雑誌』 No.487 号

丹野清人 (2002) 「外国人労働市場の分岐の理論」『国際化する日本社会』 東京大学出版会

丹野清人 (2007) 『越境する雇用システムと外国人労働者』 東京大学出版会

丹野清人 (2009) 『外国人労働者問題の根源はどこにあるのか』

<http://www.jil.go.jp/institute/zassi/backnumber/2009/06/pdf/027-035.pdf>

中央教育審議会 (1995) 『21 世紀を展望した我が国の教育のあり方について 諮問文』

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chuuou/toushin/960701s.htm

中央教育審議会 (1996) 『21 世紀を展望した我が国の教育のあり方について (第一次答申)』

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chuuou/toushin/960701.htm

中馬宏之 (2003) 「労働市場における二極分極化傾向：構内請負工急増の事例から」『フィナンシャル・レビュー』 2003 年 1 月号財務省財務総合政策研究所

坪郷實 (1989) 『新しい社会運動と緑の党－福祉国家のゆらぎの中で』 九州大学出版会

坪郷實 (2013) 『脱原発とエネルギー政策の転換』 明石書店

寺脇研 (2013) 『文部科学省「三流官庁」の知られざる素顔』 中央公論新社

寺脇研 (2006) 『格差次代を生き抜く教育』 KTC 中央出版

内閣府 (2014) 「目指すべき日本の未来の姿について」

http://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/special/future/0224/shiryou_01.pdf

中澤勇一 (2010) 「医師不足の現状と対策」 http://s-igaku.umin.jp/DATA/58_06/56_06_02.pdf

中島誠 (2007) 『立法学－序論・立法過程論』 法律文化社

二木立 (2009) 「二木立の医療経済・政策学関連ニューズレター (通巻 57 号)」

<http://www.inhcc.org/jp/research/news/niki/20090501-niki-no057.html>

日本医師会 (2007) 「医療提供体制の国際比較 (要約)」

http://dl.med.or.jp/dl-med/teireikaiken/20070207_2.pdf

日本医師会 (2008) 「「日本医師会新医師臨床研修制度と医師偏在・医師不足に関する緊急アンケート調査」結果報告 (2008 年 4 月実施)」

http://dl.med.or.jp/dl-med/teireikaiken/20080611_7.pdf

日本銀行 (2013) 「「量的・質的金融緩和」の導入について」

https://www.boj.or.jp/announcements/release_2013/k130404a.pdf

- 野島年彦（1989）「進めたい日系人の特別受け入れ」『月刊自由民主』1989年11月
- 早川純貴・内海麻利・田丸大・大山礼子（2004）『政策過程論－「政策科学」への招待』学陽書房
- 原田尚彦（1994）『行政法要論』学陽書房
- 樋口美雄（1988）「外国人労働者問題の経済学的側面」『日本労働協会雑誌』No.348
- 福田友子（2002）「国家による成員の選別過程－1990年入管法改定と「日系人」を事例として－」『社会学論考』2002年11月
- 藤井彰夫（2013）『イエレンのFRB－世界同時緩和の次を読む』日本経済新聞出版社
- 藤崎康夫（1991）『出稼ぎ日系外国人労働者』明石書店
- 本田宏（2014）『原子力をめぐるドイツの政治過程と政策対話』
http://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/bitstream/2115/54575/1/ES_63%28%29_49.pdf
- 前山隆（1990）「日系外国人労働者のその後－「日本国民」とは誰か－」『国際人流』3(7)：2-6
入管協会
- 待鳥聡史（2012）『首相政治の制度分析－現代日本政治の権力基盤形成』千倉書房
- 丸山康司（2014）『再生可能エネルギーの社会化－社会的受容性から問いなおす』有斐閣
- 水原克敏（1992）『現代日本の教育課程改革－学習指導要領と国民の資質形成』風間書房
- 三谷直紀（1993）「外国人労働者と女子パートタイム労働者」『国際協力論集』創刊号所収。
- 村松久良光（2004）「自動車産業における非典型化と職場運営」『雇用と失業に関する調査研究報告書』雇用・能力開発機構・関西社会経済研究所
- 百瀬宏・小倉充夫（1992）『現代国家と移民労働者』有信堂高文社
- 森宏一郎（2008）「医師数の統計分析：医師不足はどこで起きているか」
<http://www.jmari.med.or.jp/download/WP167.pdf>
- 文部科学省（1998）『学習指導要領（平成10年度改訂）』
http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/cs/index.htm
- 山岡淳一郎（2011）『原発と権力：戦後から辿る支配者の系譜』筑摩書房
- 吉川洋（2013）『「デフレーション－日本の慢性病」の全貌を解明する』日本経済新聞出版社
- 読売新聞政治部（2005）『自民党を壊した男－小泉政権1500日の真実』新潮社
- 笠京子（2006）「日本官僚制－日本型からウェストミンスター型へ」『日本政治 変動の30年』東洋経済新報社
- 臨時行政調査会（1982）「行政改革に関する第三次答申（基本答申）」
<http://www.ipss.go.jp/publication/j/shiryou/no.13/data/shiryou/souron/3.pdf>
- 若尾祐司、本田宏（2012）『反核から脱原発へ－ドイツとヨーロッパ諸国の選択』昭和堂
- 渡邊博頭（2006）「ものづくり現場における外国人労働者の雇用実態に関する調査結果」
<http://www.jil.go.jp/institute/research/2006/019.htm>
- 渡邊博頭（2008）「外国人労働者の活用」『ビジネス・レーバー・トレンド』2008年5月号