

Energy Innovations for a Secure, Affordable and Clean Energy System

Professor Arun Majumdar

Co-Director, Precourt Institute for Energy

Stanford University

Industrial Revolution: Horse Power to Horsepower

Steven Chu & Arun Majumdar, "Opportunities and challenges for a sustainable energy future," *Nature* **488**, 294 (2012)



250 yrs



300 Horsepower



10,000 Horsepower



100,000 Horsepower



The greatest engineering achievement of the 20th century

US National Academy of Engineering

Which innovations will shape the next 100 years of energy?

We seek technologies that have the potential to produce fundamentally new learning curves

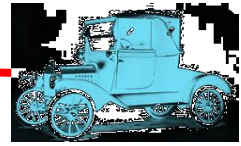
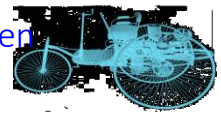
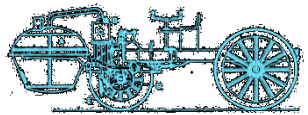
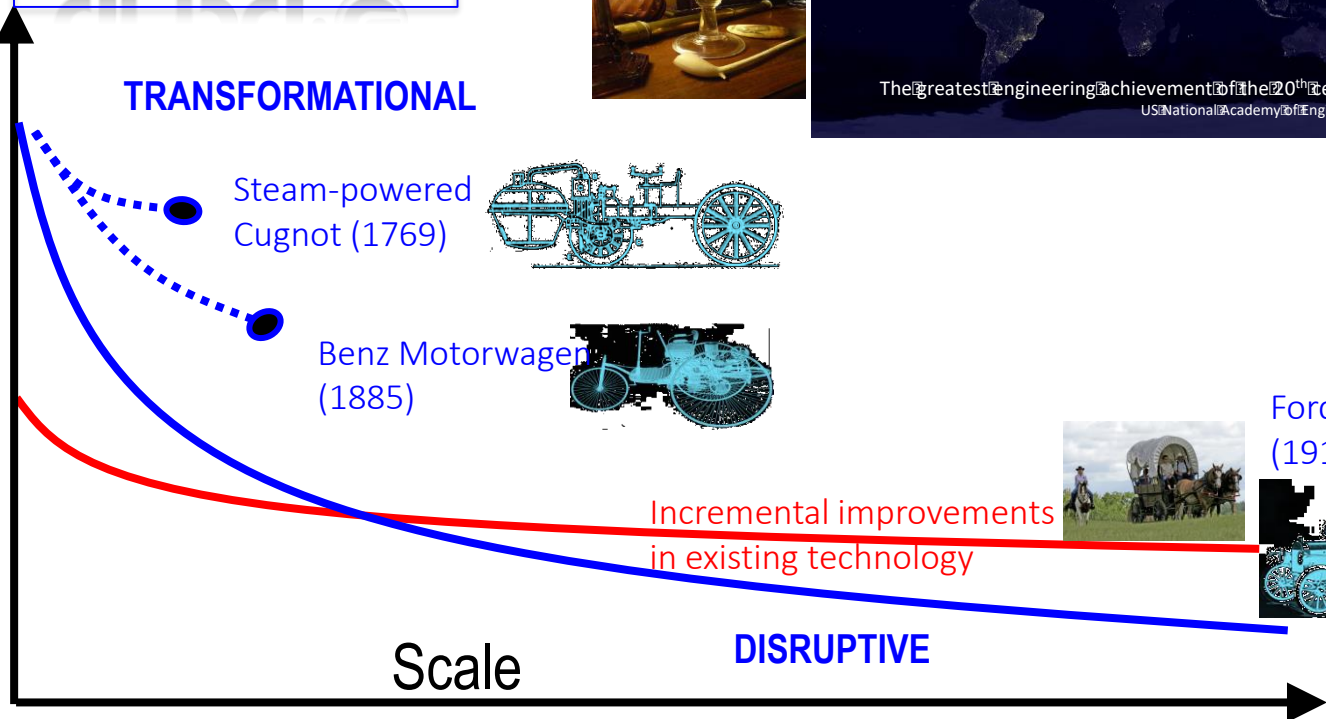


Which innovations will shape the next 100 years of energy?



TRANSFORMATIONAL

Cost Performance



Scale

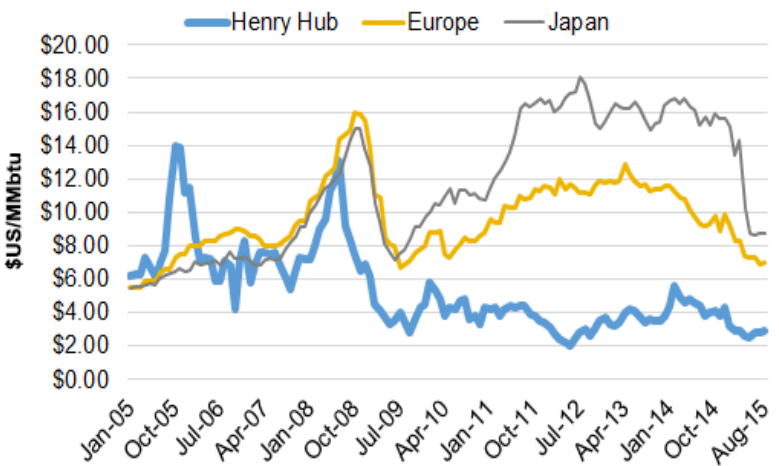
DISRUPTIVE

Major Global Energy Trends

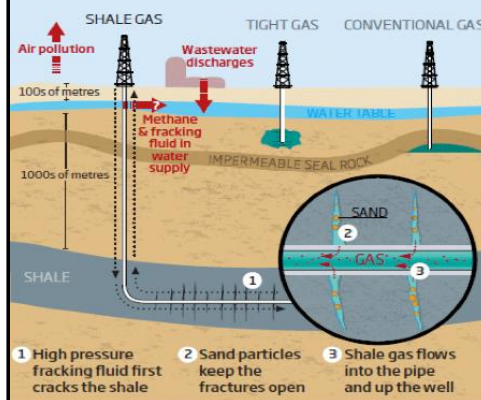
NATURAL GAS



Monthly Nominal Natural Gas Prices
U.S. Henry Hub, Europe, Japan Jan 05 - Aug 15



Source: NGI's Bidweek Survey, World Bank



SHELL PRELUDE FLNG FACILITY



- KEY FACTS**
- The Prelude facility will be 488m long and 74m wide
 - It will stay moored in water 250m deep for 25 years
 - First production in 2017 of at least 3.6 million tonnes of LNG per year
 - It will create 1000 jobs and add \$45 billion to the economy



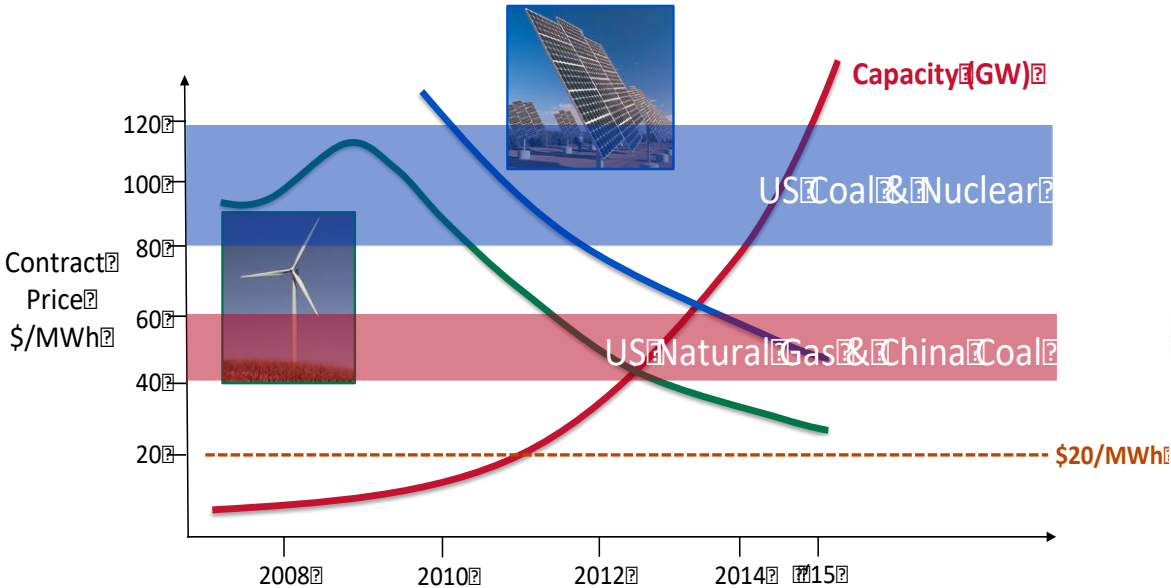
LNG Trade

Stanford Natural Gas Initiative

Major Global Energy Trends – Renewables

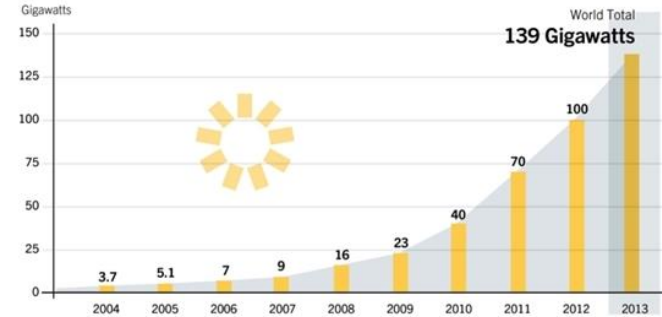


Carbon-Free Renewable Electricity



Stanford Bits and Watts Initiative for Grid Innovations

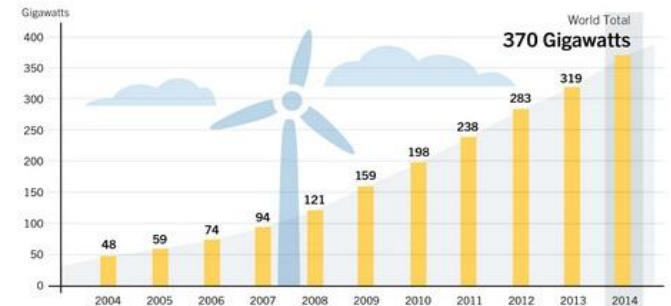
Solar PV Total Global Capacity, 2004–2013



REN21. 2014. *Renewables 2014 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat).



Wind Power Global Capacity, 2004–2014

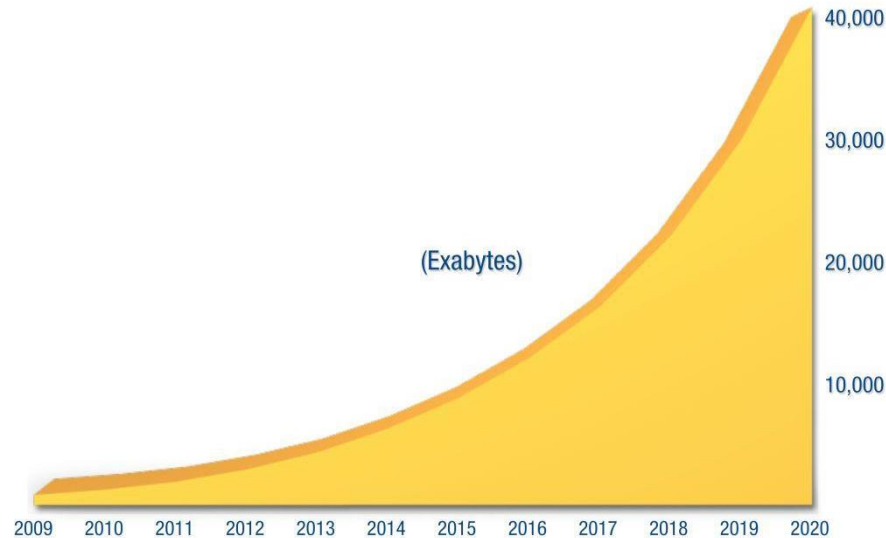


REN21 *Renewables 2015 Global Status Report*

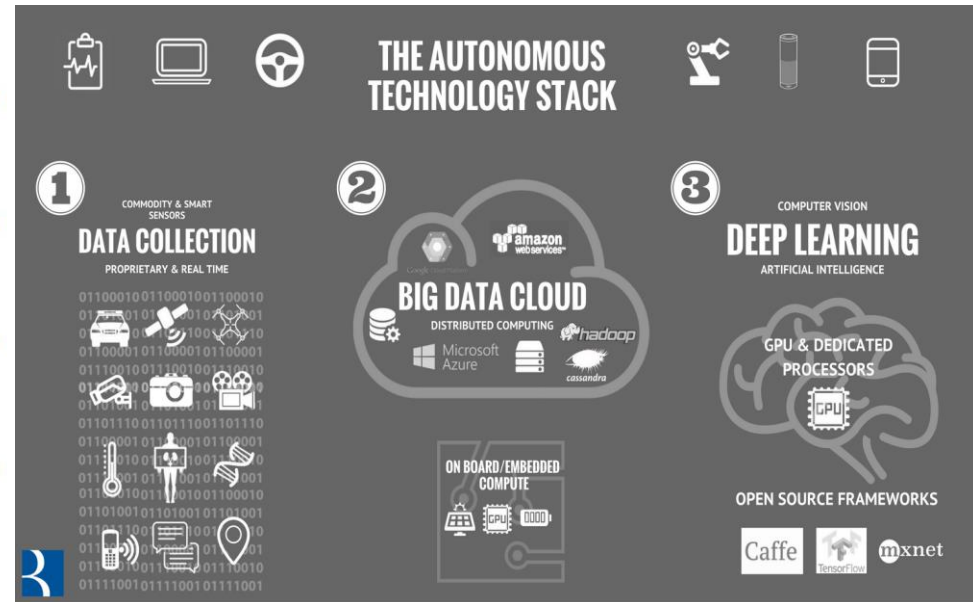


Digital Automation

The Digital Universe: 50-fold Growth from the Beginning of 2010 to the End of 2020



J. Gantz & D. Reinsel, "The Digital Universe in 2020: Big Data, Bigger Digital Shadows, and Biggest Growth in the Far East," EMC Corp. (2012)



Stanford Data Science Initiative

Stanford Bits and Watts Initiative

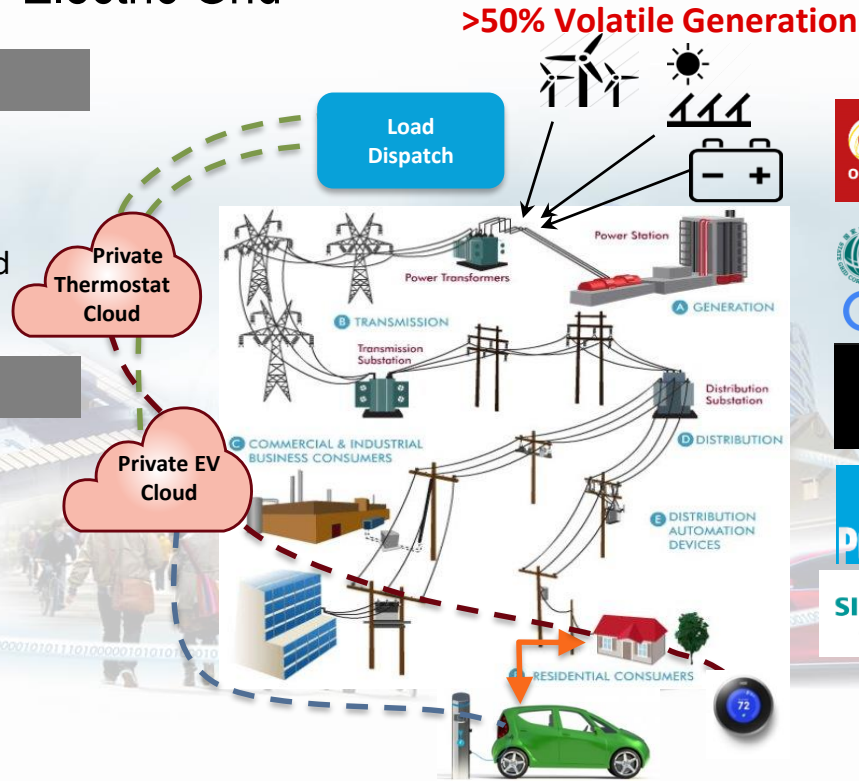
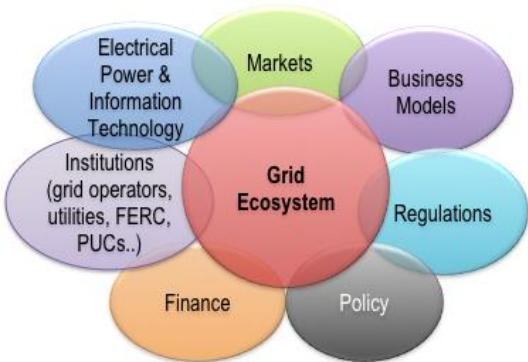
Innovation for the 21st Century Electric Grid

20th Century

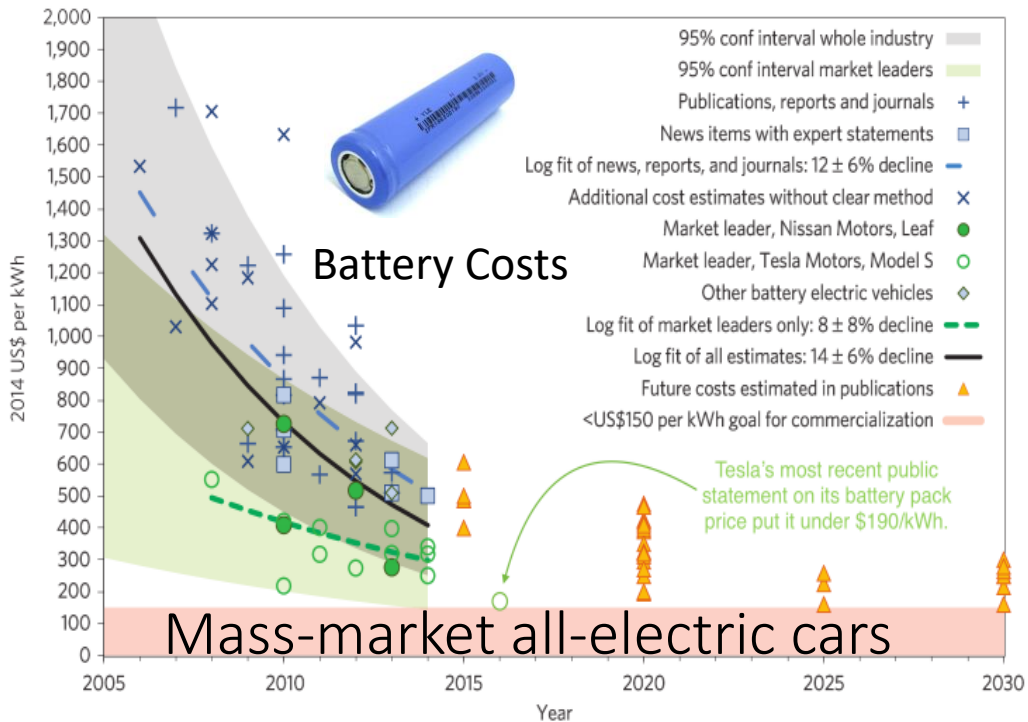
- Large centralized generation
- One way power flow
- Continuous generation follows uncontrolled load

21st Century

- Deep Decarbonization via Renewables
- Distributed Energy Resources

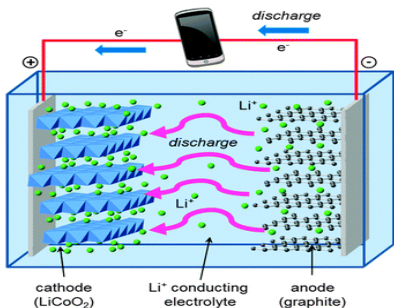


Noteworthy Global Trends – Energy Storage & Use

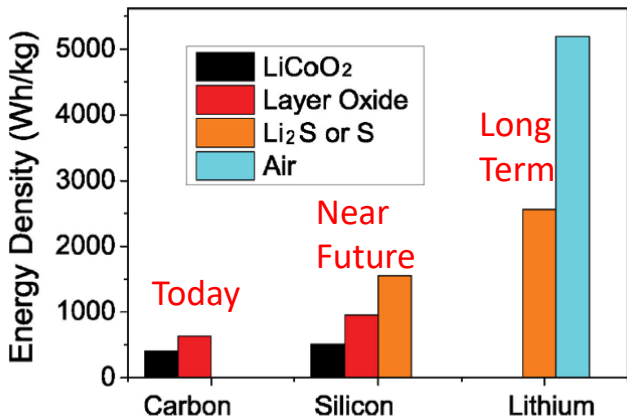


Stanford StorageX Initiative

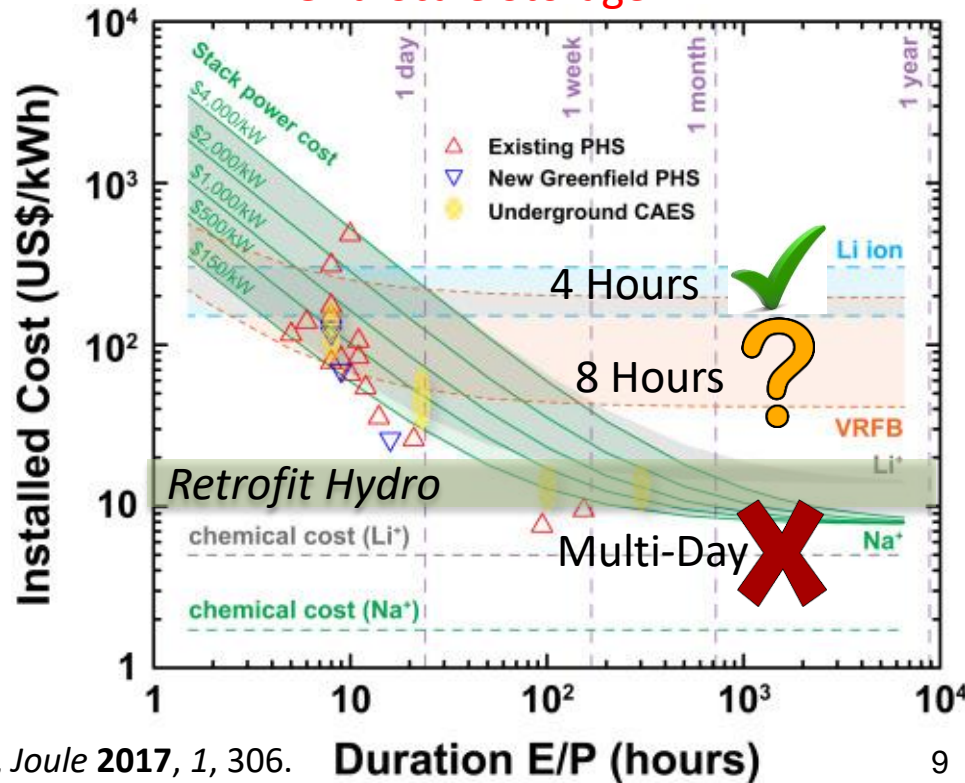
How much more cost reduction in batteries?



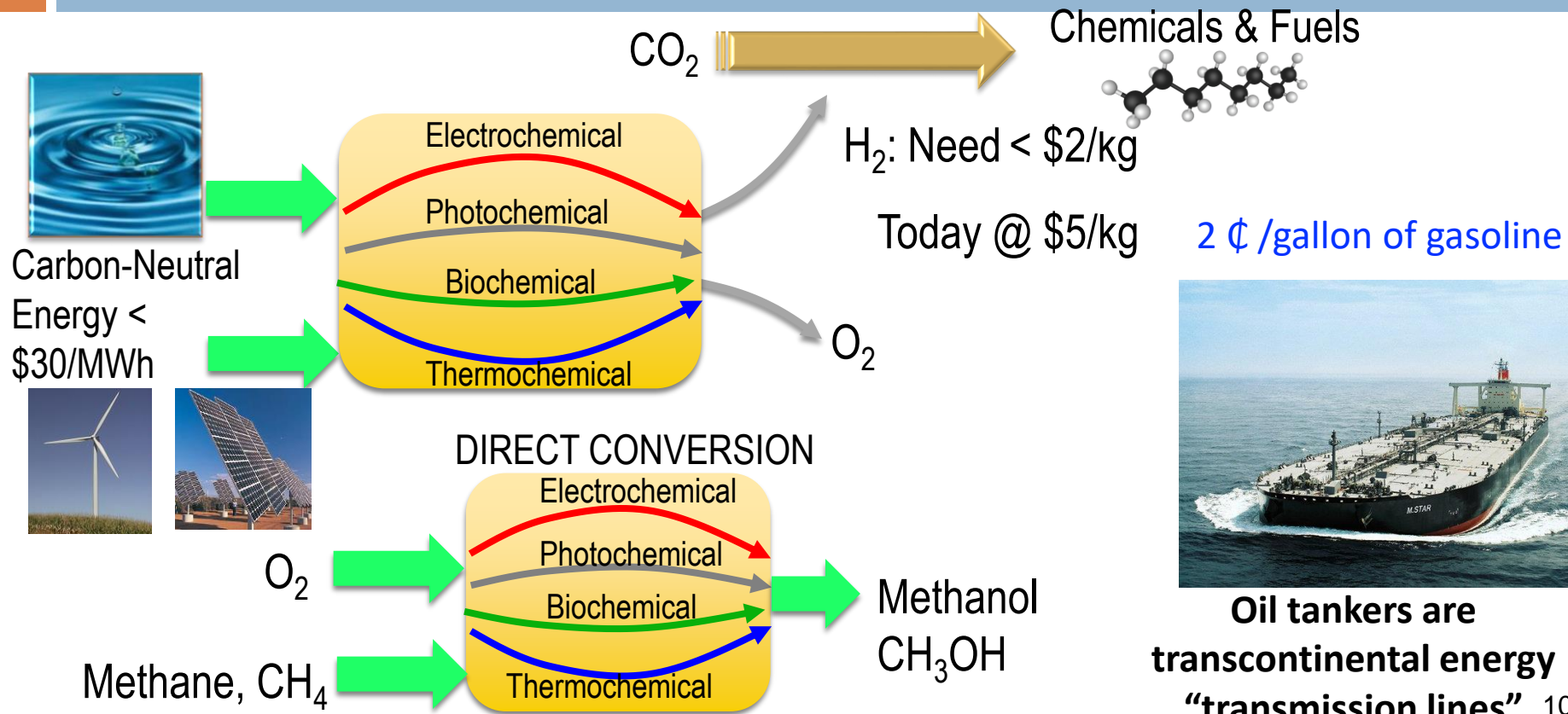
Maximum theoretical energy density



Grid-Scale Storage



Low-Carbon Fuels & Chemicals



How to decarbonize cost-effectively?



Fuel switch from coal to natural gas, with global access to cheap natural gas or low-carbon fuel (e.g., methanol)



Decarbonize grid by integrating renewables; reduce cost of nuclear energy; carbon capture utilization/seq



Decarbonize transportation via electrification and low-carbon fuels (H_2 , CH_4 , CH_3OH , zero-net carbon fuels)



Find alternatives materials and decarbonize industrial heating for steel, concrete, petrochemicals, food.



Energy efficiency & conservation

The global energy system at a tipping point for a major transformation



Decarbonization

- Global drive to reduce greenhouse gas emissions



Digitization

- Digital automation increasing efficiency and reducing cost

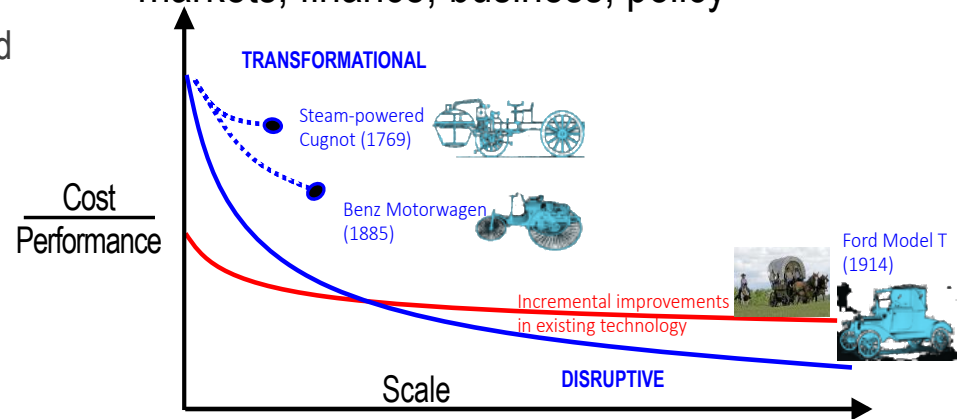


Diversification

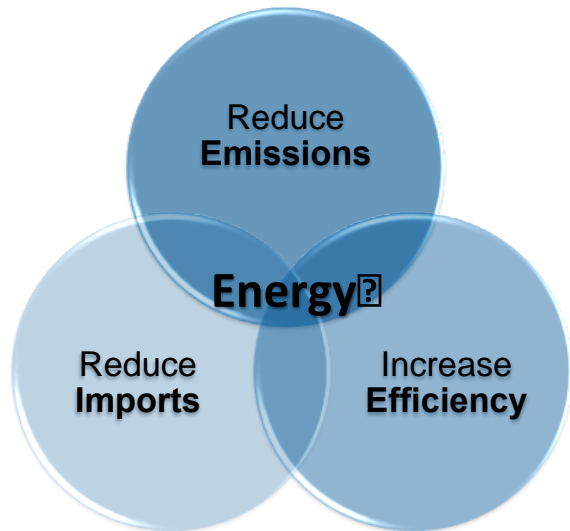
- More fuel options; more consumer choice; **hybrid centralized-decentralized system**

For one of the largest industry in the world (\$10T/year), the fundamentals are rapidly changing for the first time in 100+ years

Energy innovations needed in technology, markets, finance, business, policy

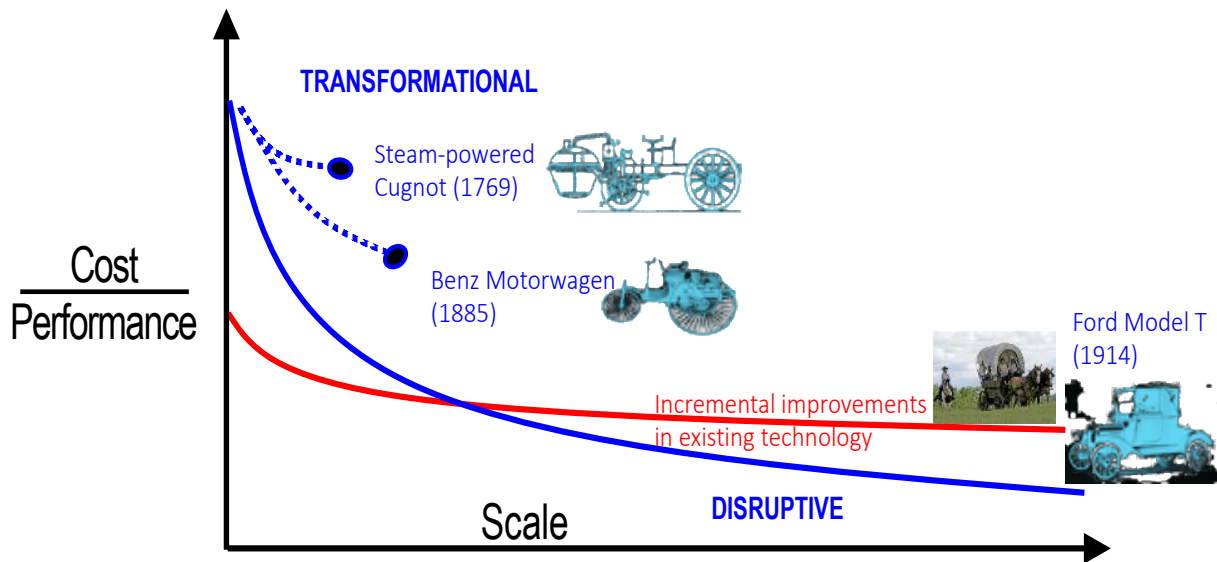


CLARITY IN HIGH-LEVEL MISSION



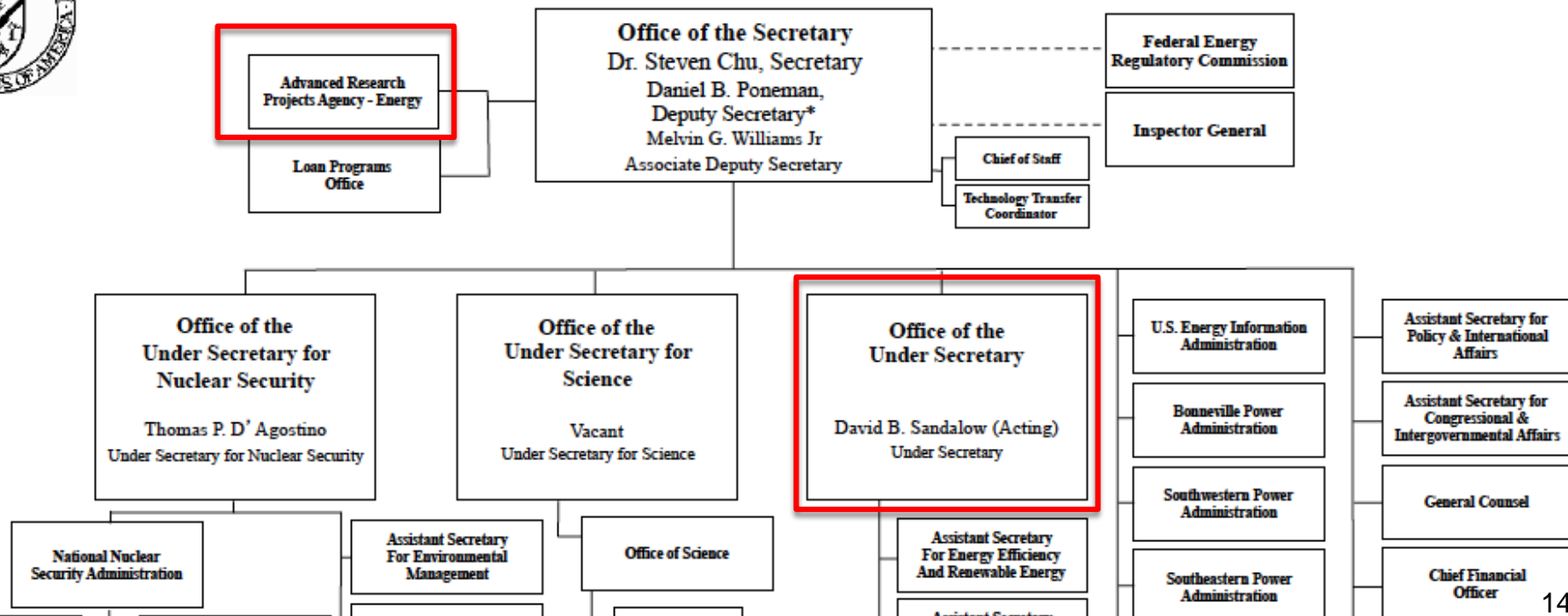
Ensure U.S. lead in advanced energy technologies

ARPA-E invests in research in science and engineering to produce breakthrough energy technologies that have the potential to produce fundamentally new learning curves



DOE Organization

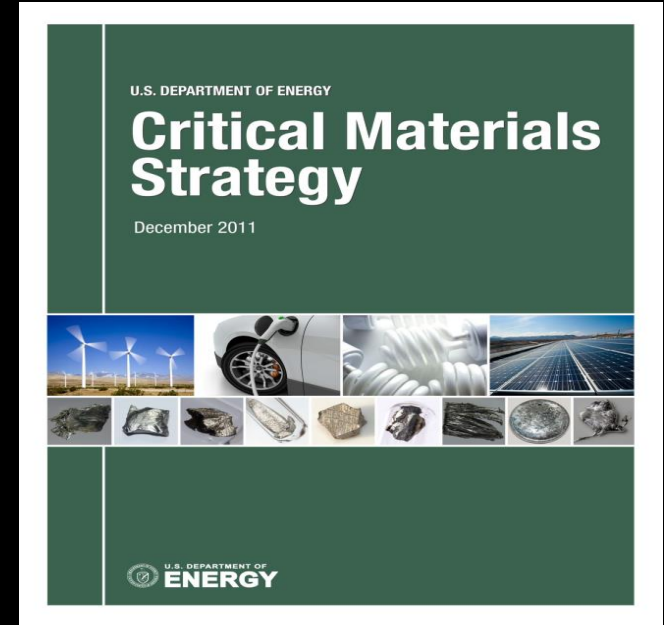
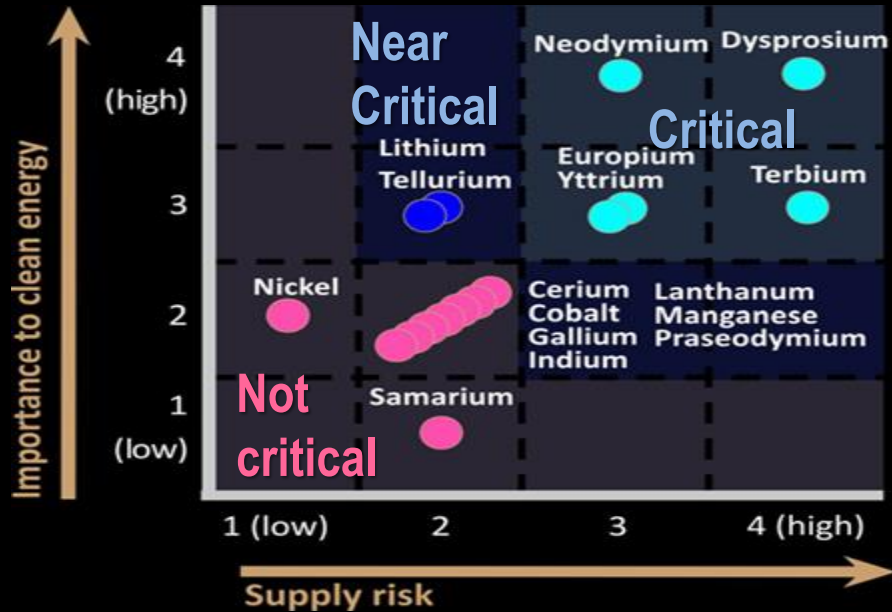
DEPARTMENT OF ENERGY



Critical Materials

Rare Earth Elements

Medium Term



REACT

RARE EARTH ALTERNATIVES TO CRITICAL TECHNOLOGIES



Mission

Identify low-cost, abundant replacement materials for rare earths and technologies that use them more efficiently.

Program Director	Projects	Total Invested
Mark Johnson	14	\$22M



Goals

- Eliminate most or all rare earth magnets in electric vehicle motors and wind generators
- Enable widespread use of electric vehicles and wind power

Approaches

- Rare earth free magnetic materials
- Low rare earth content, high Jc superconductors
- Low rare earth content electric machines

Focused Programs

2009-2012: \$430M, 14 programs

Each program has about 15 projects

Transportation

Electrofuels



BEEST



HEATS



REACT



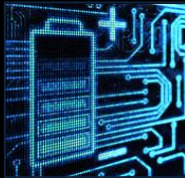
PETRO



MOVE



AMPED



SBIR/STTR



Stationary

IMPACCT



BEETIT



GRIDS



ADEPT



GENI



Solar
ADEPT



Success of any organization lies in its people & culture

ARPA-E Director must be recognized scientist/engineer and leader

ARPA-E Director has authority to hire/fire any Program Director **“A’s hire A’s... B’s hire C’s”**



Grueling interview process; Highly selective recruiting **Limited Time of 3–5 years in ARPA-E**

How would you like to spend \$30-60M on solving the nation’s most important energy problems?

External Strategy

- 1. Define yourself before others define you – mission, people, culture, operational efficiency, financial integrity, metrics of success**
- 2. ARPA-E Brain Trust: Recruit technology business leaders to have a stake in your success. Create a larger community of stakeholders**
- 3. Partnership with Congress & White House and focus on non-partisan topic – Innovation.**
- 4. Convene the community & enable networking**



energy innovation summit

2012feb27-29
washingtondc



Bill Gates

Founder and Chairman
Microsoft



Ursula Burns

Chairman & CEO
Xerox Corp.



Susan Hockfield

President & Professor
Of Neuroscience, MIT



Bill Clinton

Former President of USA



Lee Scott

Former CEO
Walmart

www.energyinnovationsummit.com



Fred Smith

Chairman, President, and CEO
FedEx Corp.

A photograph of a modern Stanford University building with a red-tiled roof and solar panels. In the background, the iconic red-domed tower of the Sather Gate is visible against a clear blue sky.

安全・安価でクリーンな エネルギーシステムに関する技術革新

アルン・マジュマダール教授

スタンフォード大学

プレコートエネルギー研究所所長

仮訳

産業革命：馬の動力から馬力へ

スティーブン・チュー、アルン・マジュマダール

「持続可能なエネルギー社会に向けた契機と挑戦」『Nature』第488号, p.294 (2012)



250年



300馬力



10,000馬力



100,000馬力



20世紀最大の技術成果
米国工学アカデミー

エネルギーの
次の100年
を形作る技
術革新は？

人類は根本的に新しい学習曲線を生み出す、潜在力のある技術を訴求する



250年

10,000馬力

100,000馬力

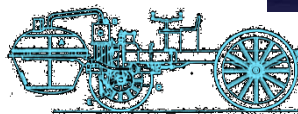
エネルギーの次の100年を形作る技術革新は？



20世紀最大の技術成果
米国工学会アカデミー

技術変化

蒸気三輪車 (Cugnot) (1769)



ベンツ・モーターワーゲン (1885)



既存技術の逐次改良

フォード・モデルT (1914)



費用
性能

規模

破壊的技術

世界の主なエネルギーの動向

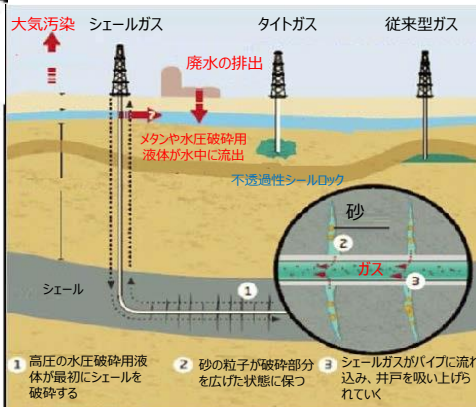
NATURAL GAS



天然ガスの月間名目価格
米国ヘンリーハブ、欧州、日本 1月5日—8月15日



出典：世界銀行NGIビッドウィークサーバイ



- 1 高圧の水圧破砕用液体が最初にシェールを破砕する
- 2 砂の粒子が破砕部分を広げた状態に保つ
- 3 シェールガスがパイプに流れ込み、井戸を吸い上げられていく



出典：米国エネルギー情報管理局。各種公表研究からのデータに基づく。カナダおよびメキシコの産区はA R Iから。2011年5月9日更新

シェール・プレリウド F L N G 施設

ボーイング747 全長71m



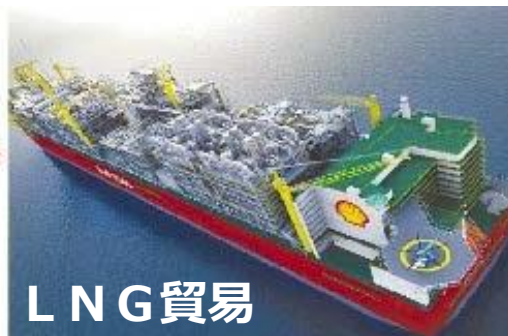
クイーン・メアリー (345m)



シェール・プレリウド F L N G (488m)

キーポイント

- * 全長488m、全幅74m
- * 水深250mに25年間係留される予定
- * 2017年の最初の生産では、少なくとも年間360万トンのL N Gを産出
- * 1000人の雇用と450億ドルの付加的経済効果を生む見込み



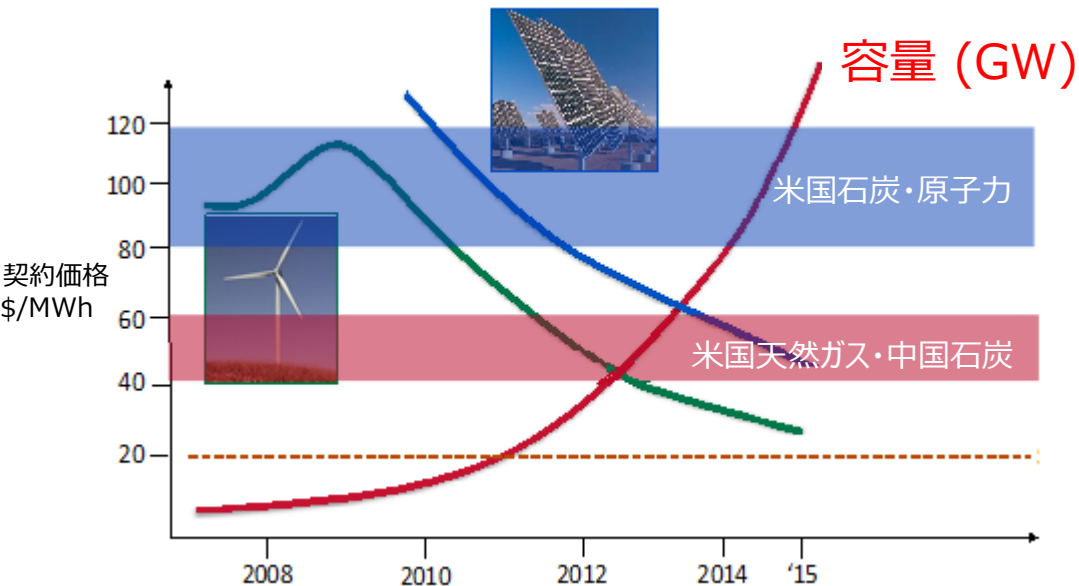
L N G 貿易

スタンフォード
天然ガスイニシアティブ

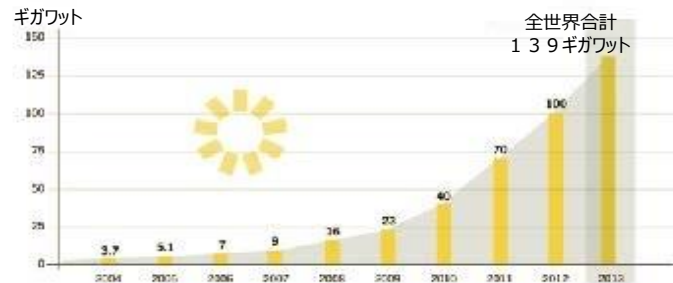
世界の主なエネルギーの動向 - 再生可能エネルギー



カーボンフリー 再生可能エネルギー電力



世界の太陽光発電設備容量 2004-2013



REN21 (2014)『再生可能エネルギー世界白書2014』
パリ: REN21事務局



世界の風力発電設備容量 2004-2014



EN21 (2015)『再生可能エネルギー世界白書2015』



**スタンフォード
グリッド技術革新に向けてのBits & Watts イニシアティブ**

デジタル自動化

デジタルの世界：2010年初めから2020年末までの間に50倍の成長



J. ガンツ, D. レインセル「2020年のデジタル世界：ビッグデータ、より大きなデジタル・シャドウ、そして極東での最大の成長」EMC 社 (2012)



スタンフォード
データ科学イニシアティブ

スタンフォード Bits & Watts イニシアティブ

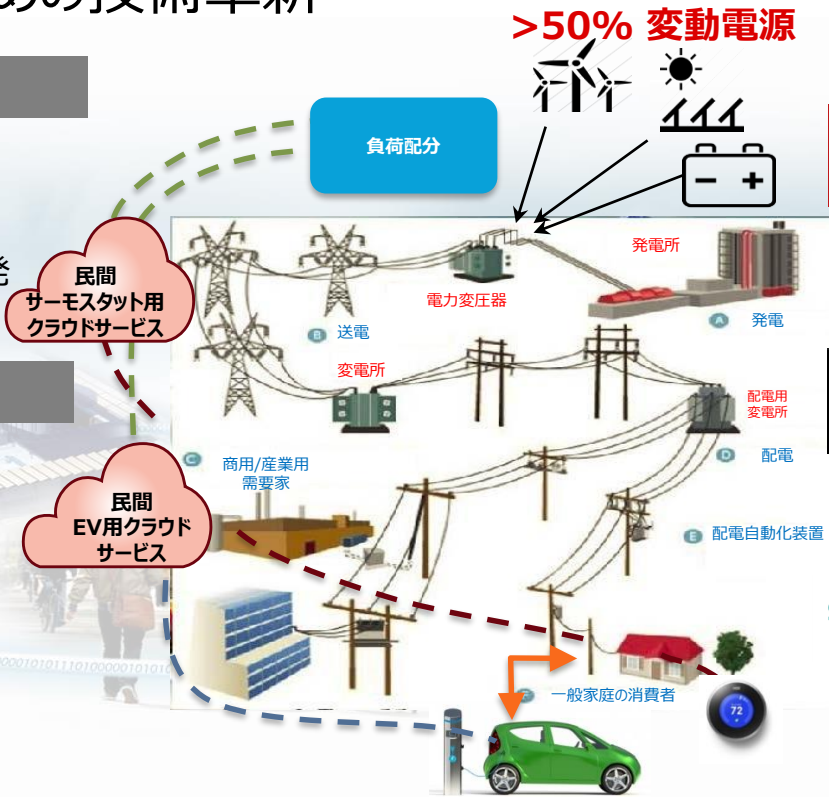
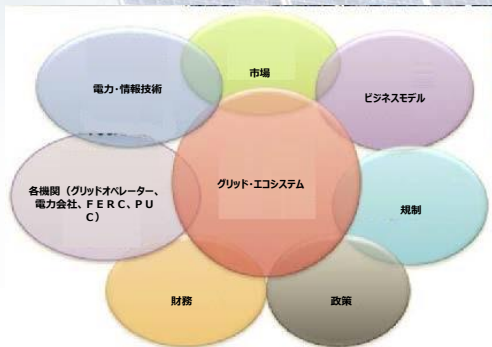
21世紀の電力グリッドのための技術革新

20世紀

- 大型の集中型発電
- 一方向の電力供給
- 負荷（需要）を制御せず、それに追従して発電し続ける

21世紀

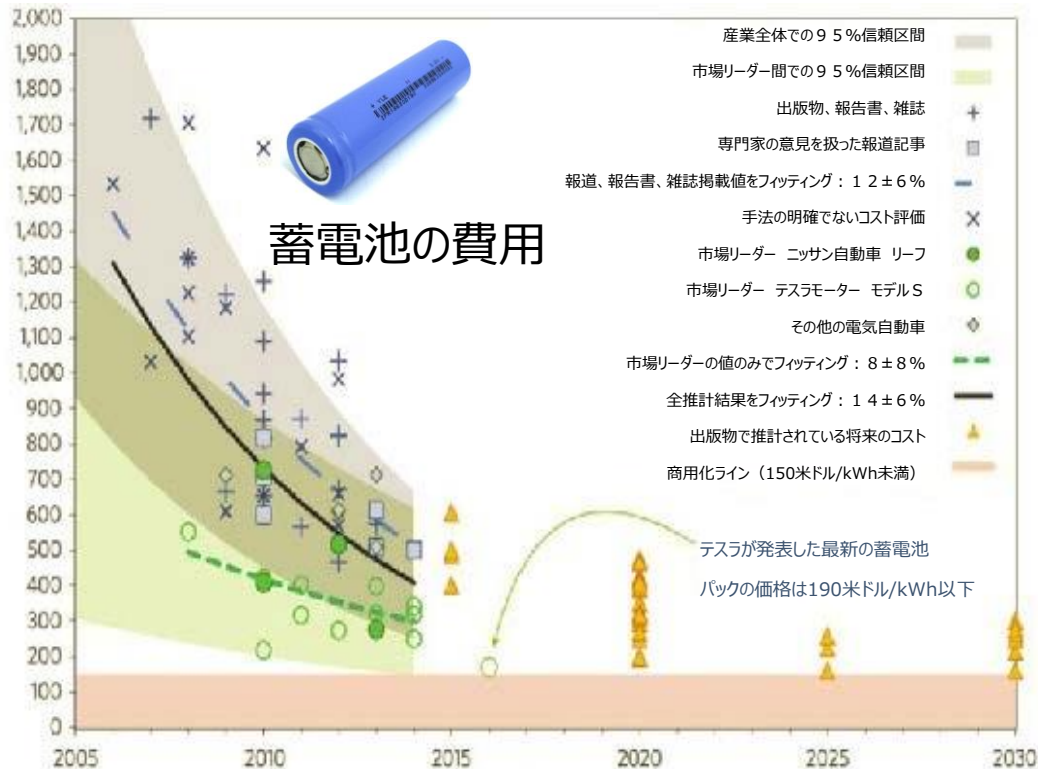
- 再生可能エネルギーによる徹底した脱炭素
- 分散型エネルギー資源



注目すべきグローバル・トレンド - エネルギーの貯蔵と使用

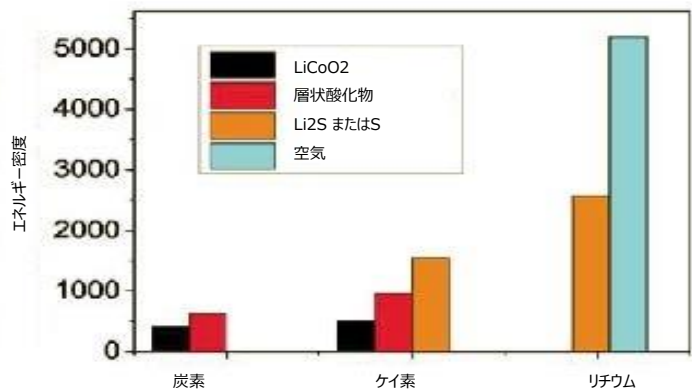
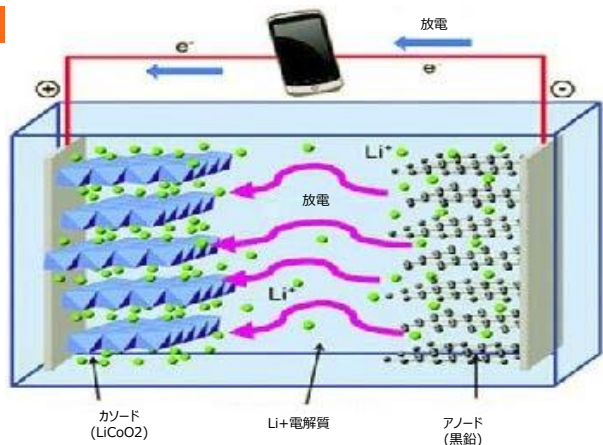


2014年におけるkWhあたり価格 (米ドル)

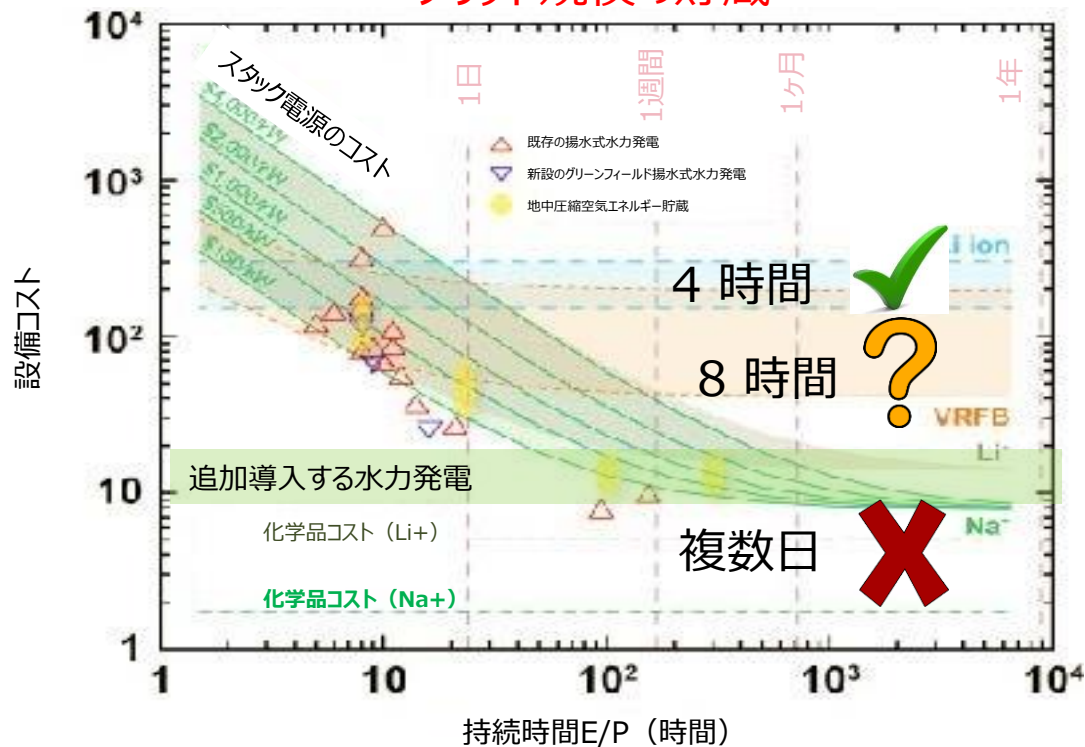


スタンフォード
蓄エネルギーイニシアティブ

蓄電池のさらなるコスト低減はどこまで進むのか？

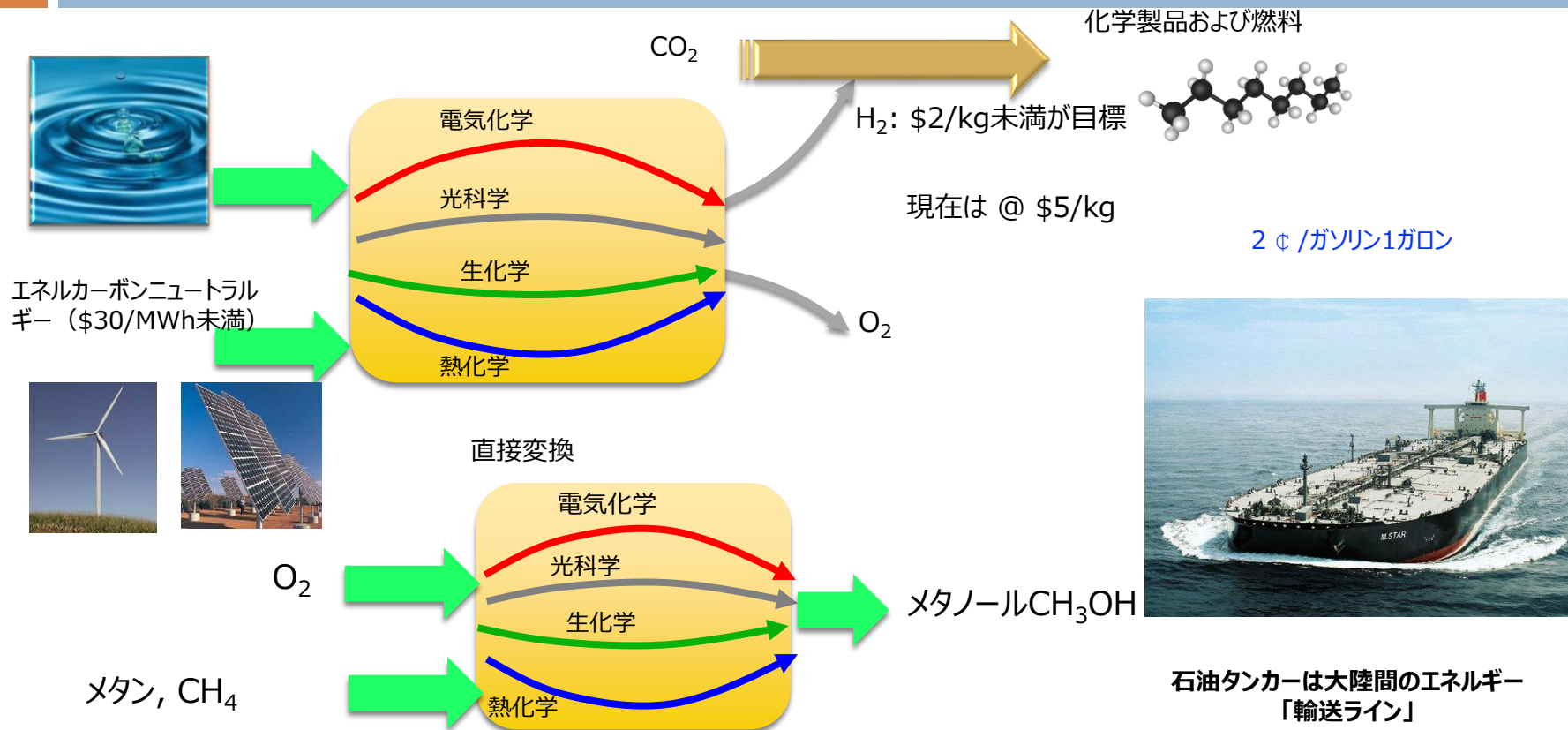


グリッド規模の貯蔵



Li ほか『ジュール』2017, 1, 306.

低炭素燃料および化学製品



如何に費用対効果を高めつつ脱炭素を実現するか？



世界中で安価な天然ガスや（メタノールなどの）低炭素燃料が手に入るようになり、燃料は石炭から天然ガスに移行した。



再生可能エネルギーの統合によるグリッドの脱炭素化； 原子力エネルギーのコスト削減； 今後はCCUへ



EV化および低炭素燃料(H_2 , CH_4 , CH_3OH , ネットゼロ炭素燃料)による、輸送部門の脱炭素化



代替原料の発見、および鉄鋼、コンクリート、石油化学、食品各産業における熱需要の脱炭素化



エネルギー効率と省エネルギー

大きな転換点に立つ世界のエネルギーシステム



脱炭素化

温室効果ガス排出の削減
に向けた国際的な取組



デジタル化

デジタル自動化による効率
改善とコスト低減

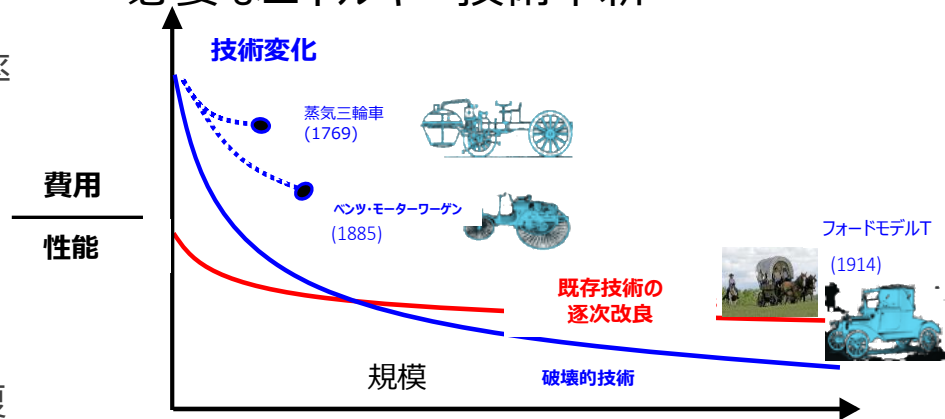


多様化

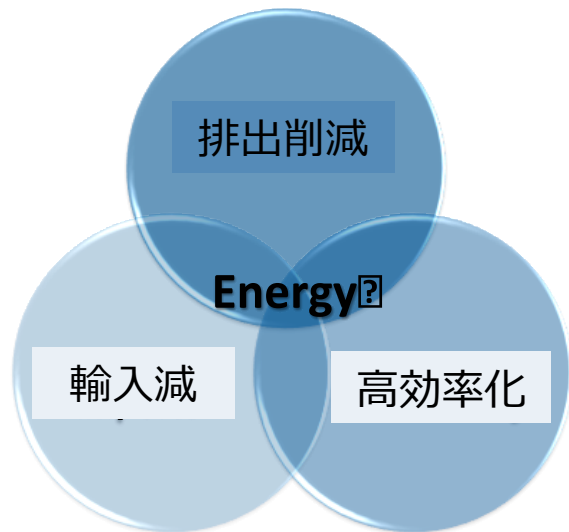
燃料オプションの多様化；
消費者オプションの多様
化；集中型・分散型の複
合システム

世界最大の産業の一つ (\$10T/年)は、この
100年余りの間で初めて、根本が急激に変化し
つつある

技術、市場、財務、ビジネス、および政策に
必要なエネルギー技術革新

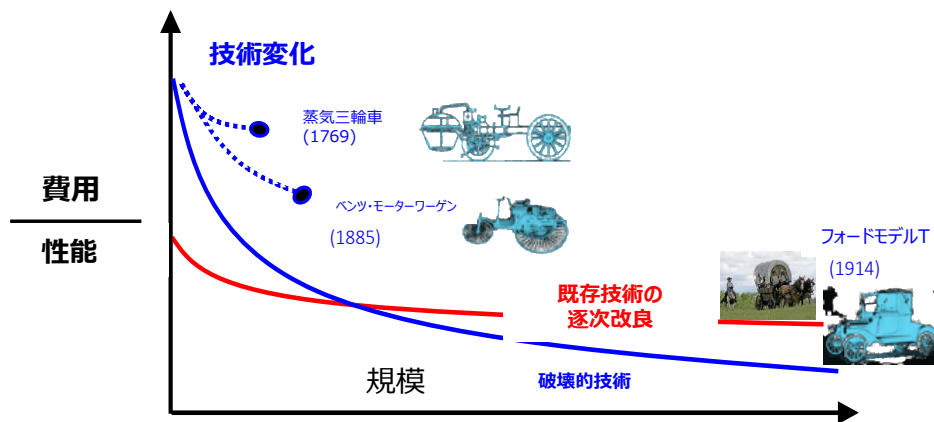


高レベルミッションは明瞭



先進エネルギー技術における
米国の優位性確保のために

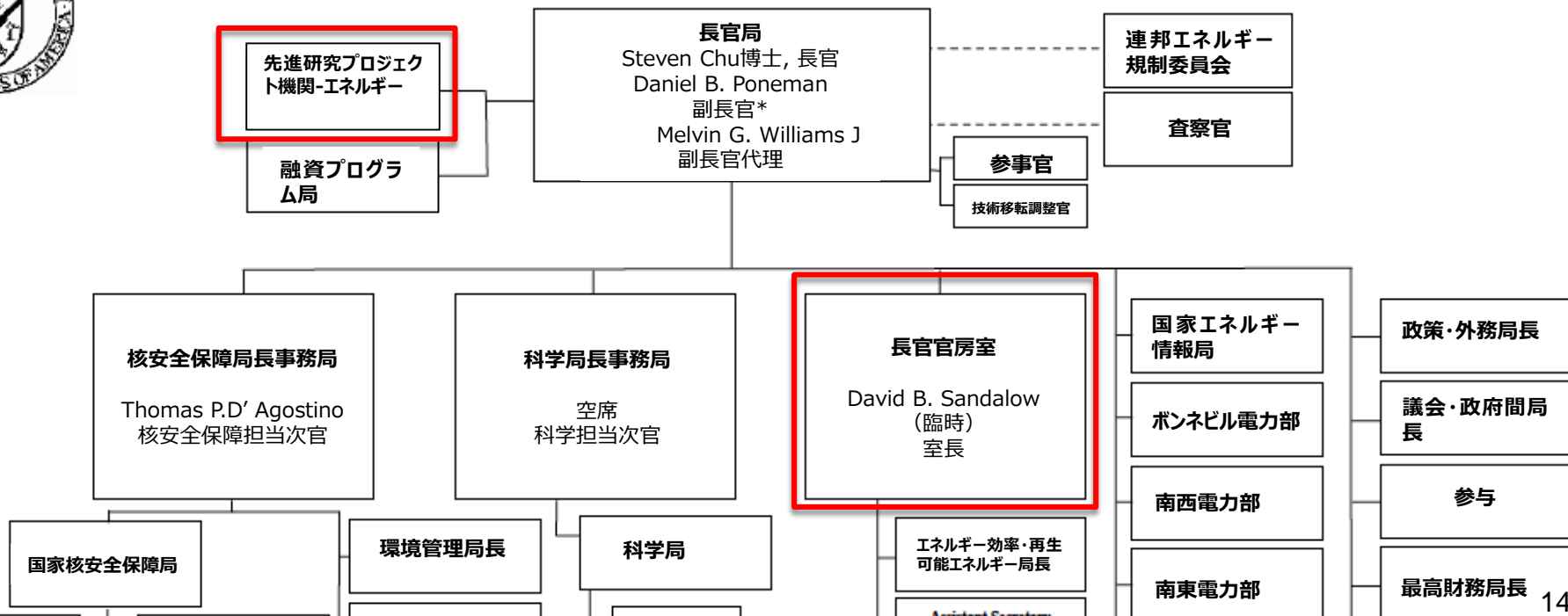
ARPA-Eは、ブレークスルー技術を生み出す科学や工学調査に投資する。
それらは、根源的に新たな成長曲線を生み出す可能性がある技術である。



米国エネルギー省 (DOE) 組織図



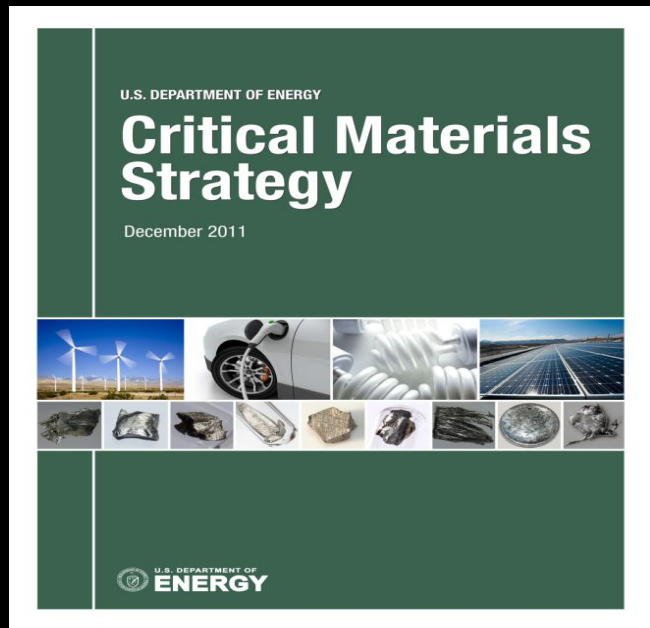
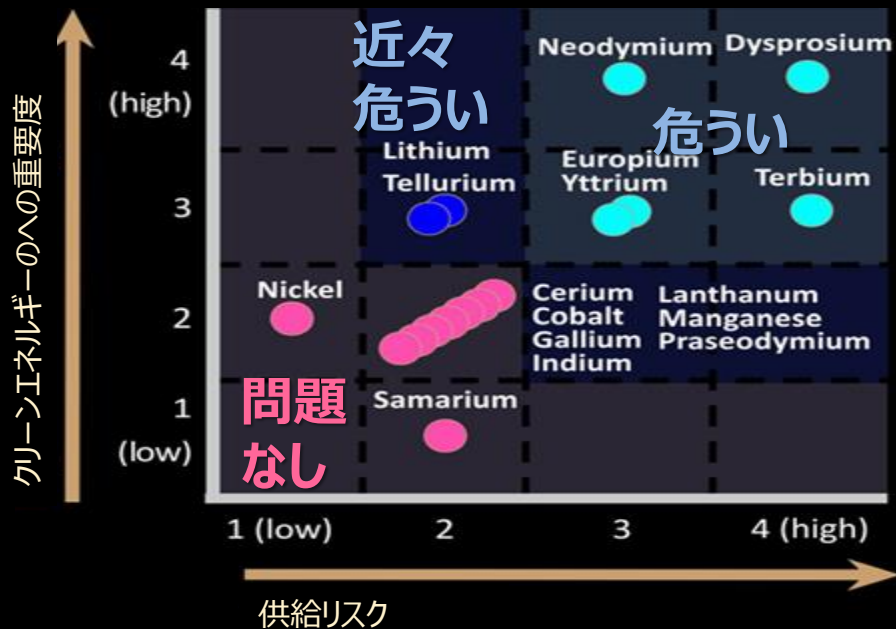
米国エネルギー省



リスクを含む素材

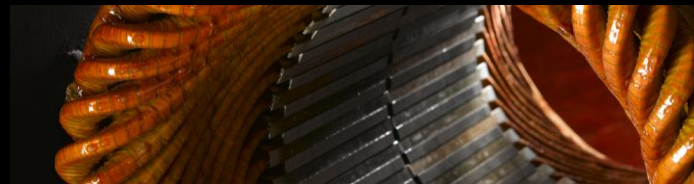
レアアースについて

中期



REACT

リスクを含む技術におけるレアアース代替



ミッション

レアアースにおける低コスト化、代替材料の特定、より効率的に利用する技術の特定

プログラム ディレクター	プロジェクト	投資合計
マーク ジョンソン	14	22百万ドル



目的

- 電気自動車と風車で使われている、レアアース由来の磁石のうち大半もしくは全てについて不要にする
- 電気自動車と風車をより広く利用可能にする

アプローチ

- 磁石フリーのレアアース
- レアアースを減らし、 J_c 超伝導体を高める
- レアアース利用の電気機械を減らす

2009-2012: 430百万ドル、14 プログラム
各プログラムは約15のプロジェクトから構成

トランスポーテーション

Electrofuels



BEEST



PETRO



MOVE



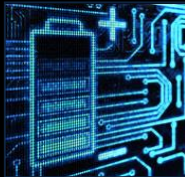
HEATS



REACT



AMPED



SBIR/STTR



IMPACCT



ADEPT



BEETIT



GENI



GRIDS



Solar ADEPT



ステーションナリー

あらゆる組織の成功要因は人と文化である

ARPA-Eディレクターは、科学者もしくは技術者とリーダーから構成されなければならない

ARPA-Eディレクターは、全プログラムディレクターの人事権を所有

“Aの雇用... Bの雇用Cの”



厳しい面接プロセス; 選択肢の多い採用

ARPA-Eは、3-5年限定

国の重要なエネルギー問題の解決に関して、
3000～6000万ドルをどのように費やしたいですか。

外部戦略

1. 成功へのミッション、人、文化、業務改善、財務健全性、指標について、まず自身で定義すべき
2. ARPA-E幹部は信じている：テクノロジービジネスリーダーを雇用することは、成功にむけた一歩である。より多くのステークホルダーがかかわる組織を作る
3. 議会とホワイトハウスとの協力、党派にかかわらないトピック
-イノベーション
4. コミュニティを開き、ネットワークを利用可能にする



2012feb27-29
washingtondc

エネルギーイノベーションサミット



Bill Gates
創業者・会長
Microsoft



Ursula Burns
会長兼CEO
Xerox Corp.



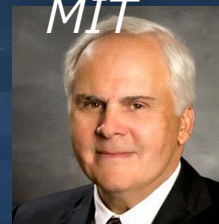
Susan Hockfield
社長兼教授
*Neuroscience,
MIT*



Bill Clinton
元アメリカ合衆国大統領



Lee Scott
前CEO
Walmart



Fred Smith
会長、社長兼CEO
FedEx Corp.

www.energyinnovationsummit.com