

エネルギーミックスで考慮すべきこと

1. エネルギーミックスの**大胆な**シナリオ
2. エネルギーの**歴史**（論点整理）
3. 2100年代へ**残すべき**エネルギー**技術**（産業）
 - (1) 化石燃料枯渇後の電源要件
 - (2) 再エネ電源大量導入時代の課題
 - (3) 海外のエネルギー戦略
4. 核燃料サイクル(FBR)の**必要性**と**安全性**
 - (1) 核燃料サイクルと高速増殖炉の仕組み
 - (2) 軽水炉と高速増殖炉の違い

講師略歴

主な経歴: 1950(S25)年生(68歳)富山県出身, 神戸市在住

職歴: 1973年4月 三菱重工業(株)入社／機械, 原子力設計部門(神戸)及び本社(東京)勤務を経て, 2009年4月 西菱エンジニアリング(株)へ転籍／原子力技術サービス部長。2014年2月 三菱日立パワーシステムズ(株)入社。関西支社専任技術者。大阪府立大学工業高専非常勤講師など

資格: 2006年2月 **技術士**登録。技術士(機械、原子力・放射線、総合技術監理)／米国プロジェクトマネジメント協会(PMI)認定**PMP**(Project Management Professional)／**労働安全コンサルタント**／第三種**電気主任技術者**／システムアドミニストレータ(初級)

所属学協会: 日本機械学会／日本原子力学会／電気学会／電気設備学会／日本技術士会／大阪技術振興協会／京都技術士会／米国PMI

専門: 物流機械／原子燃料の取扱・輸送・貯蔵技術／MOX燃料加工技術

趣味: 日本古代史／古神社・古墳巡り

考えてみよう エネルギーミックスの大胆なシナリオ

1. エネルギーミックスの**変遷** (資源枯渇から見る)

- A. **現状** : 再エネ(少量) + 火力(油／ガ, 追従) + 軽水(非追従) 【2020年頃】
- B. **枯渇Ⅰ** : 再エネ(中量) + 火力(炭ガ, 追従) + 軽水(非追従) 【2070年頃】
- C. **枯渇Ⅱ** : 再エネ(大量) + 火力(炭ガ, 追従) + 軽水/FBR(非／追従) 【2110年頃】
- D. **枯渇Ⅲ** : 再エネ(大量) + FBR(追従) 【2130年頃】 ※子が100歳, ひ孫が40歳

※Ⅰ : 石油／ガス／金属・非金属枯渇, Ⅱ : ウラン枯渇(軽水炉の場合), Ⅲ : 石炭枯渇

2. 新しい**発想**で考えてみよう

- (1) **需要予測**では残すべき技術は「見える化」しない

※将来残すべき技術: 将来リスクに対応, 開発に長期間

- (2) **電気**だけでは「見える化」しない ⇒ 一次エネルギー／水素(EV, 燃料電池車)

※電気は貯蔵が苦手 ⇒ 貯蔵し易い形(水素)で貯蔵 ⇒ 水素製造高温ガス炉

- (3) **発電**だけでは「見える化」しない ⇒ 電力系統(送配変)の強靱化(北海道ブラックアウト)

※泊発電所があったらは**本質**ではない

- (4) **基本**が理解されていない(?) ⇒ 例. バイオは再エネ, 石炭は? (生成過程が同じ)

考えてみよう エネルギーの歴史と将来へ残すべき技術

1. エネルギーの歴史を見てみよう(論点整理)

(1) 化石燃料を枯渇させた世代が将来技術を残さないのは無責任ではないか。

(2) エネルギーの歴史(過去)から何を学ぶか、学んだのか。

①エネルギー密度, ②文明滅亡・幸せ, ③人口・産業, ④森林保護, との関係

2. 2100年代のエネルギー(電源)を予測してみよう。残すべき技術(産業)は何か。

(1) 化石燃料枯渇後の電源要件:

①資源量, ②生活・産業の維持, ③環境保全, ④安定供給, ⑤安全

(2) 再エネ(変動)電源大量導入時代の課題:

①電源出力変動／電力系統, ②蓄電／蓄エネ(水素, 圧空), ③エネルギー変換

(3) 海外の戦略(中国, インド, 露, 仏): 日本が最先端と誤解していないか。

3. 核燃料サイクルの必要性を考えてみよう

(1) 化石燃料はいつ枯渇するのか。その時, どんなエネルギー源が使えるか。

(2) ウラン資源を軽水炉で枯渇させて良いのか。

(3) 軽水炉と高速増殖炉は何が違うのか(仕組み, 燃料, 安全性, 廃棄物対策など)。

4. 核燃料サイクルの安全性を考えてみよう

(1) 長寿命(資源生成)技術は安全性が高いと言えるか。

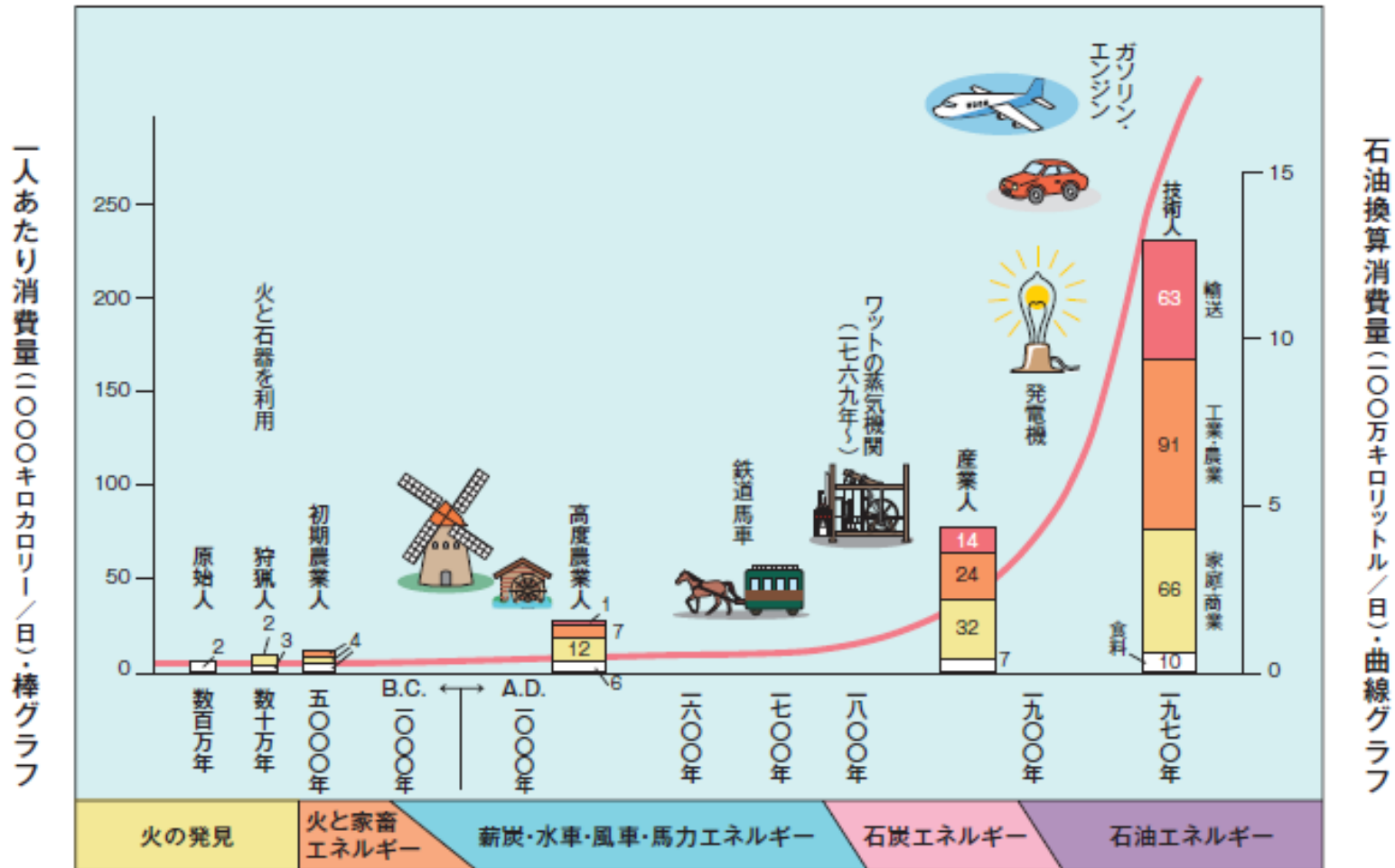
(2) 開発済み／開発中の技術は将来世代に有益か

(核融合, トリウム炉, 負荷追従小型炉, 水素製造高温ガス炉, Pu加工など)。

(3) 超長半減期の放射性廃棄物は短半減期化しておくべきか。

エネルギーの歴史を俯瞰する(総括)

エネルギーと文明 エネルギーの高密度化が人口増をもたらした



薪炭/水車/風車/馬力は再エネ 薪炭は森林乱伐の源で、乱伐を石炭が救った
エネルギーの歴史は低密度から高密度へ 高密度化が人口増の源

石炭の利用がなければ「禿山」だった 化石燃料が無ければ「人口増」はなかった

石炭(薪炭より高密度)が森林破壊を救った(日本)

江戸時代より現代日本の方が森林が多い？



森林面積

1891(明治24)年 1700万ha

現在 2500万ha



エネルギーが変遷した意味を考
えてみよう ➡ 将来の選択

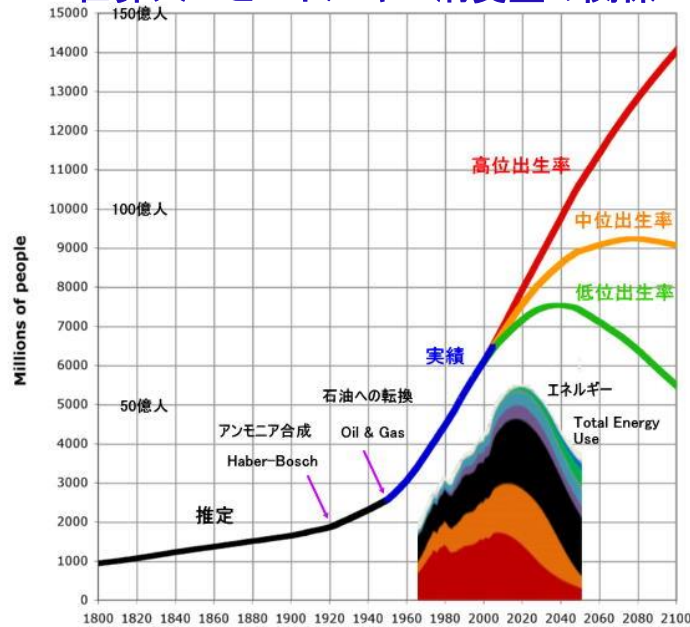
火／薪炭(※) 奈良時代:大仏づくり→森林枯渇→遷都

江戸時代:幕末の里山は壊滅状態 国土の1/4が荒地 浮世絵の禿山

出典:エネルギー環境歴, 田中紀夫／木材・石炭・シェールガス, 石井彰

2100年代の世界予測 エネルギー消費量

世界人口とエネルギー消費量の関係



人口増加は化石燃料に依存した一過性のもの
2030年代は化石燃料の貢献が残り、真の問題が顕在化していない

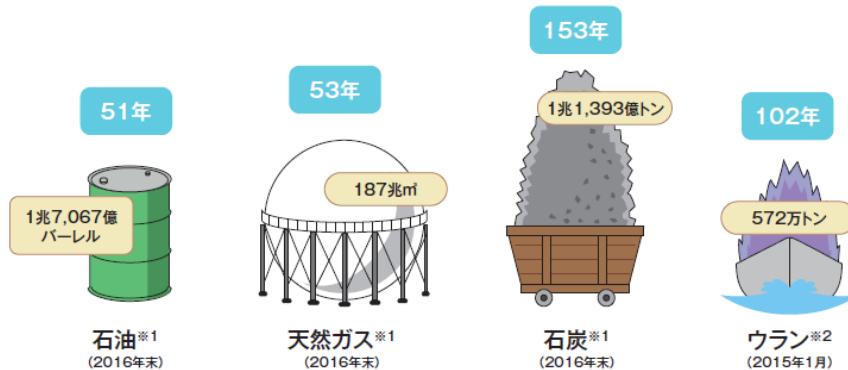
一人あたりエネルギー消費量(世界平均)は
 2020年をピークに年平均1%で下降

2009年 1.8 toe/人・年 toe:石油換算トン
 2050年 0.9 toe/人・年

化石燃料 2050年 全体の61% → 2110年 0%
 世界人口 2050年以降横ばい(仮定)

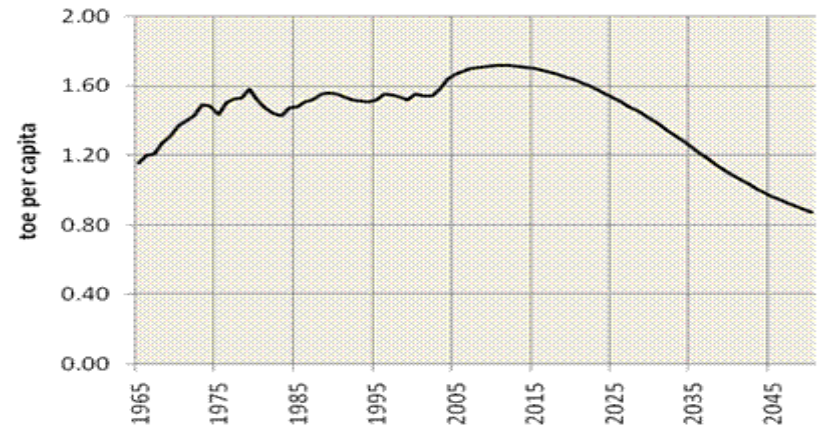
2100年 約0.35 toe/人・年 (0.9×0.39)
 ※2009年 インド(0.6 toe/人・年)の6割

↑今日の繁栄は化石燃料によってもたらされた証拠



石油51年, 天然ガス53年, 石炭 153年,
 ウラン102年(軽水炉), 数千年(FBR)

世界の一人あたりエネルギー消費量の実績と予測

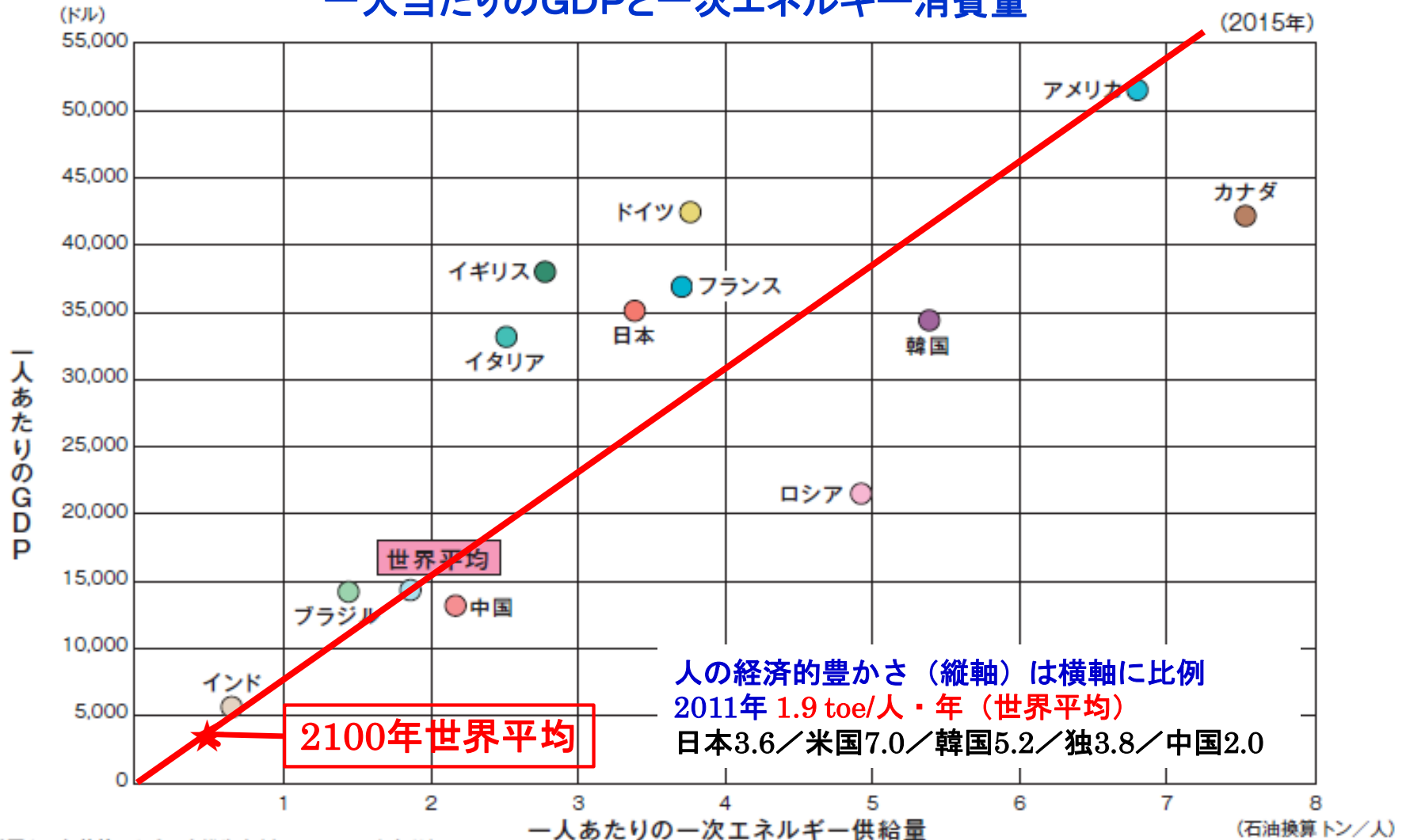


人間の幸せとは 2100年世界GDP予想

エネルギーの重要性

出典：原子力・エネルギー図面集

一人当たりのGDPと一次エネルギー消費量

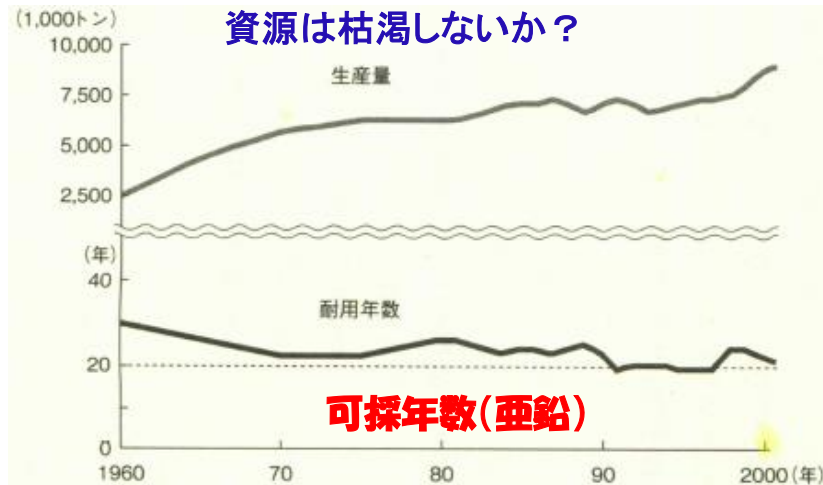


(注) 購買力平価換算による国内総生産(米ドル、2010年価格)

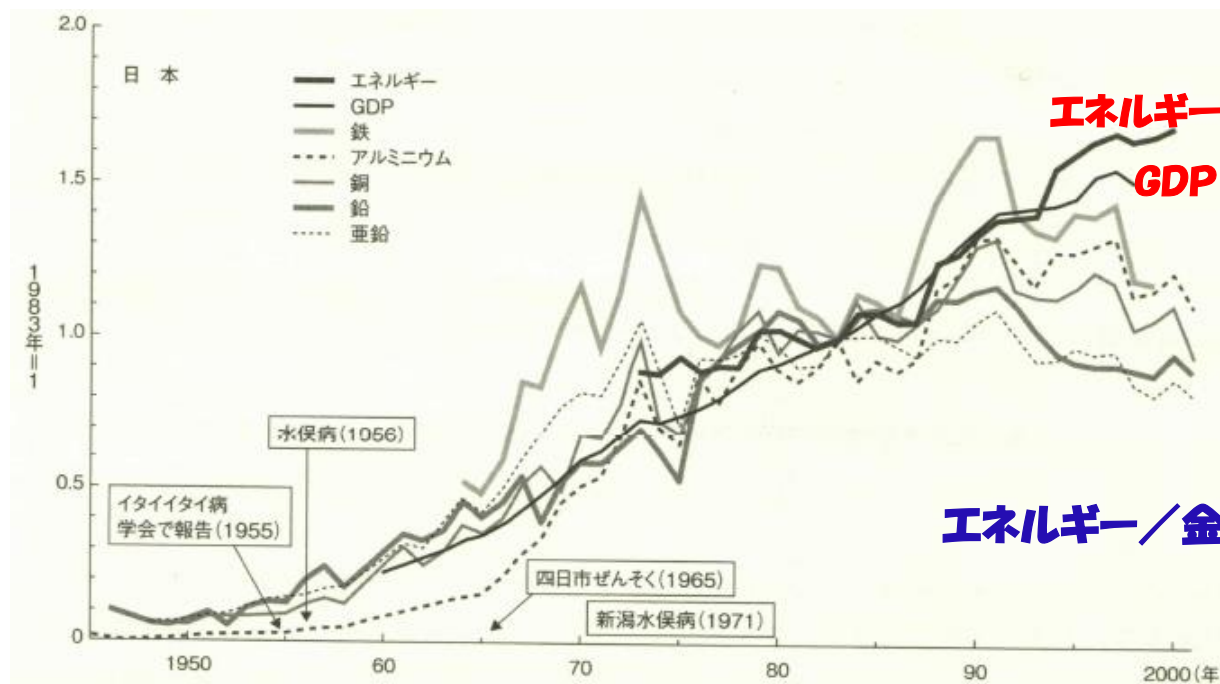
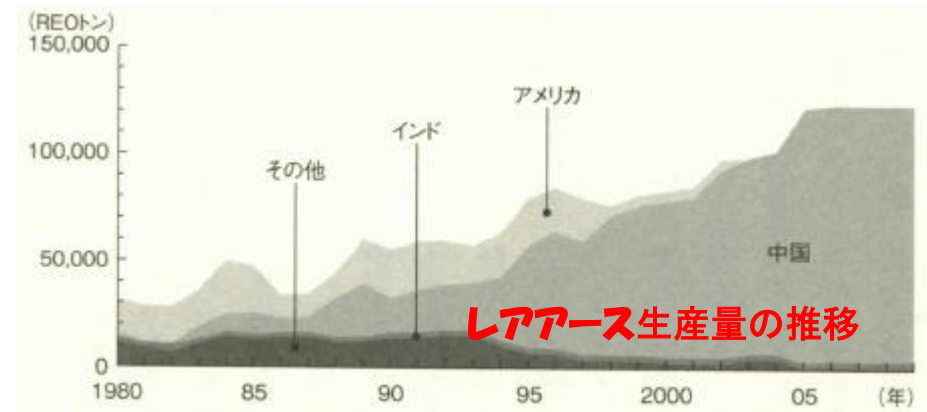
人間の幸せとは様々だが、一人当たりのGDPとすれば・・・化石燃料が枯渇する時代の国民の生活は

地下資源の枯渇

資源量がGDPと相関



資源はナショナリズム 中国はいかにして独占となったか



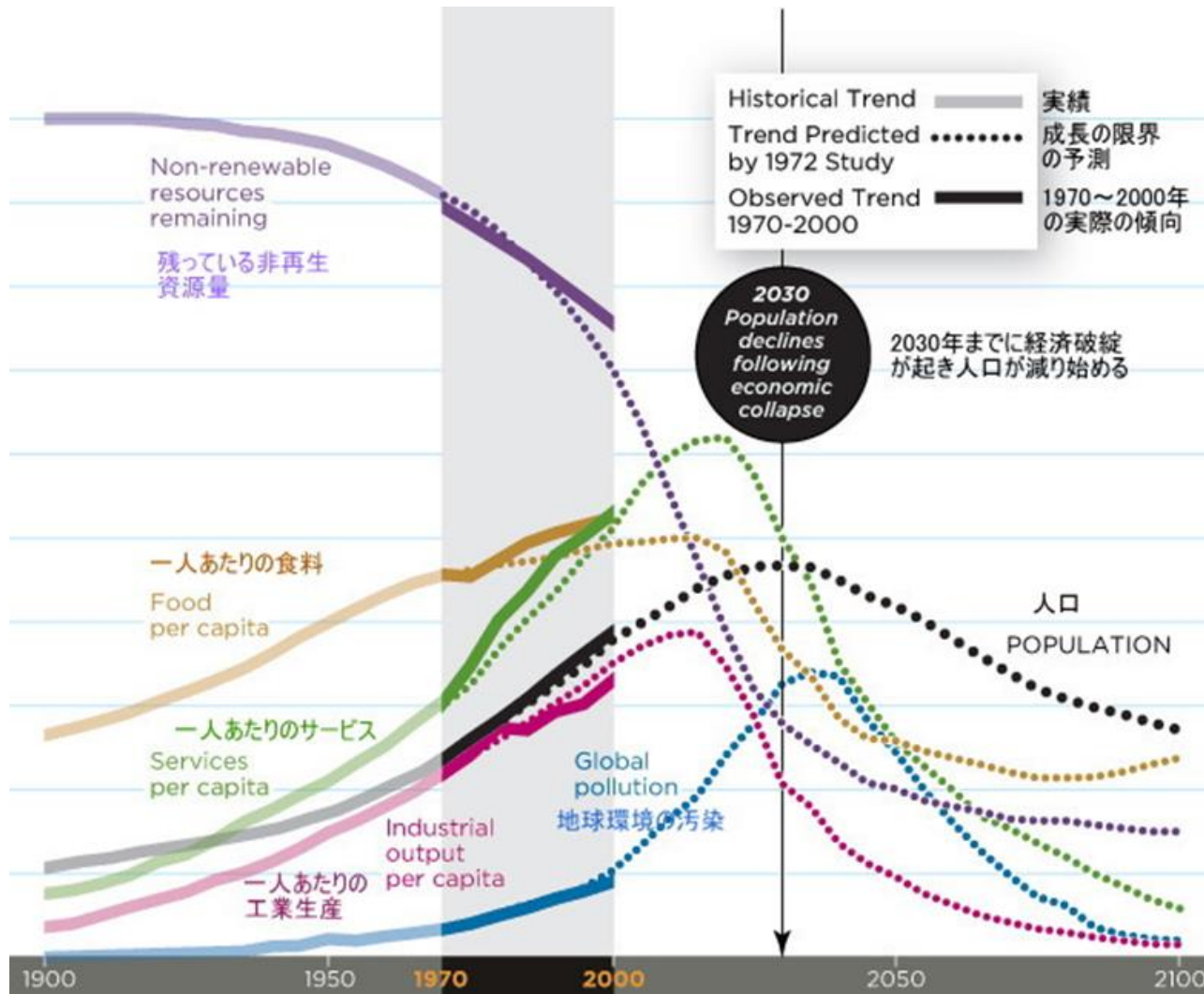
エネルギー／金属消費量がGDPと相関

主要金属消費量とエネルギー消費量、GDPの成長（日本、1983年=1）

出典：ベースメタル枯渇、西山

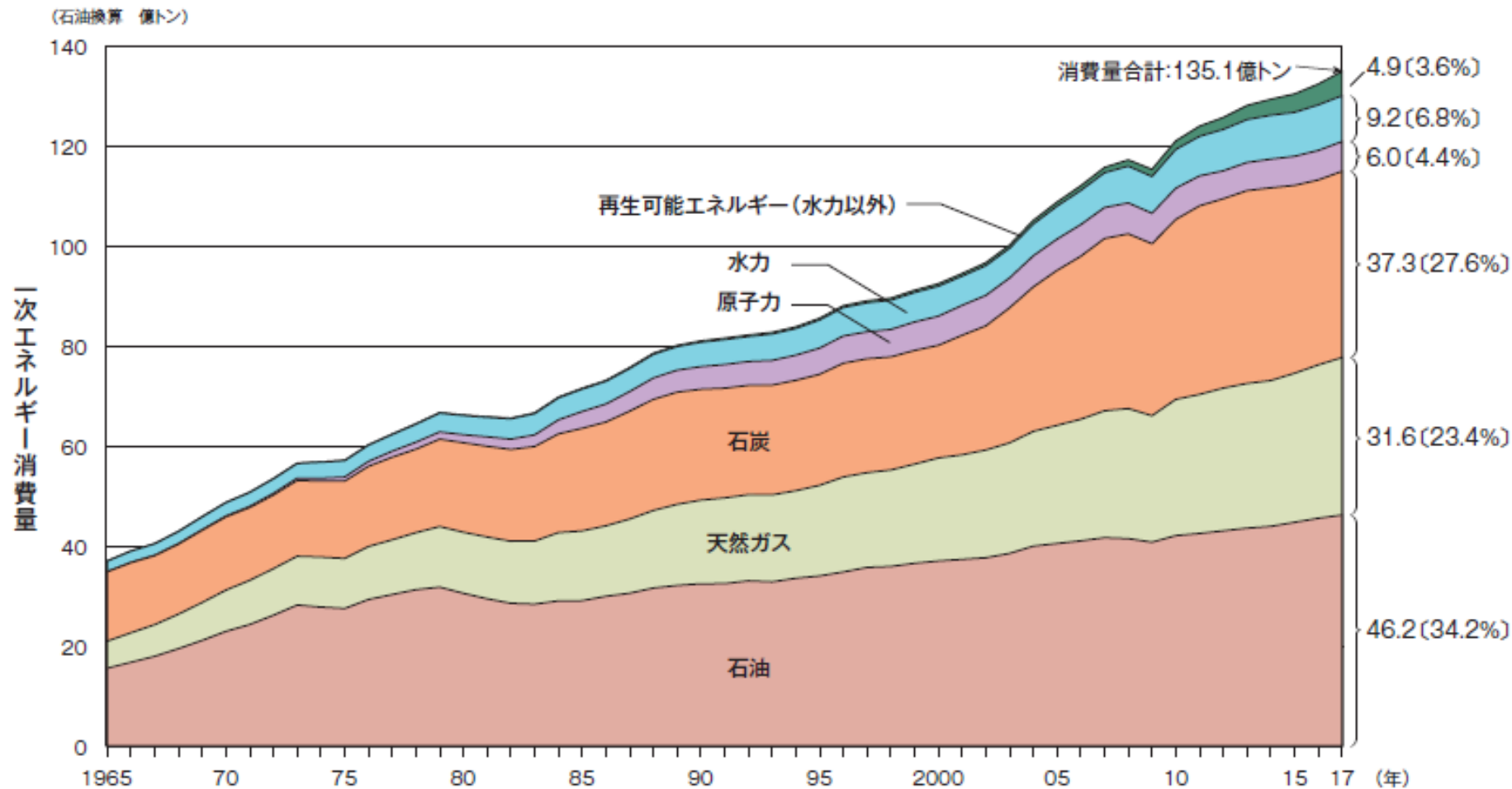
2100年代の世界予測 成長の限界

約30年間(1970~2000年)の実績はほぼ「成長の限界」の予測どおり



ローマクラブ成長の限界 40年後の検証

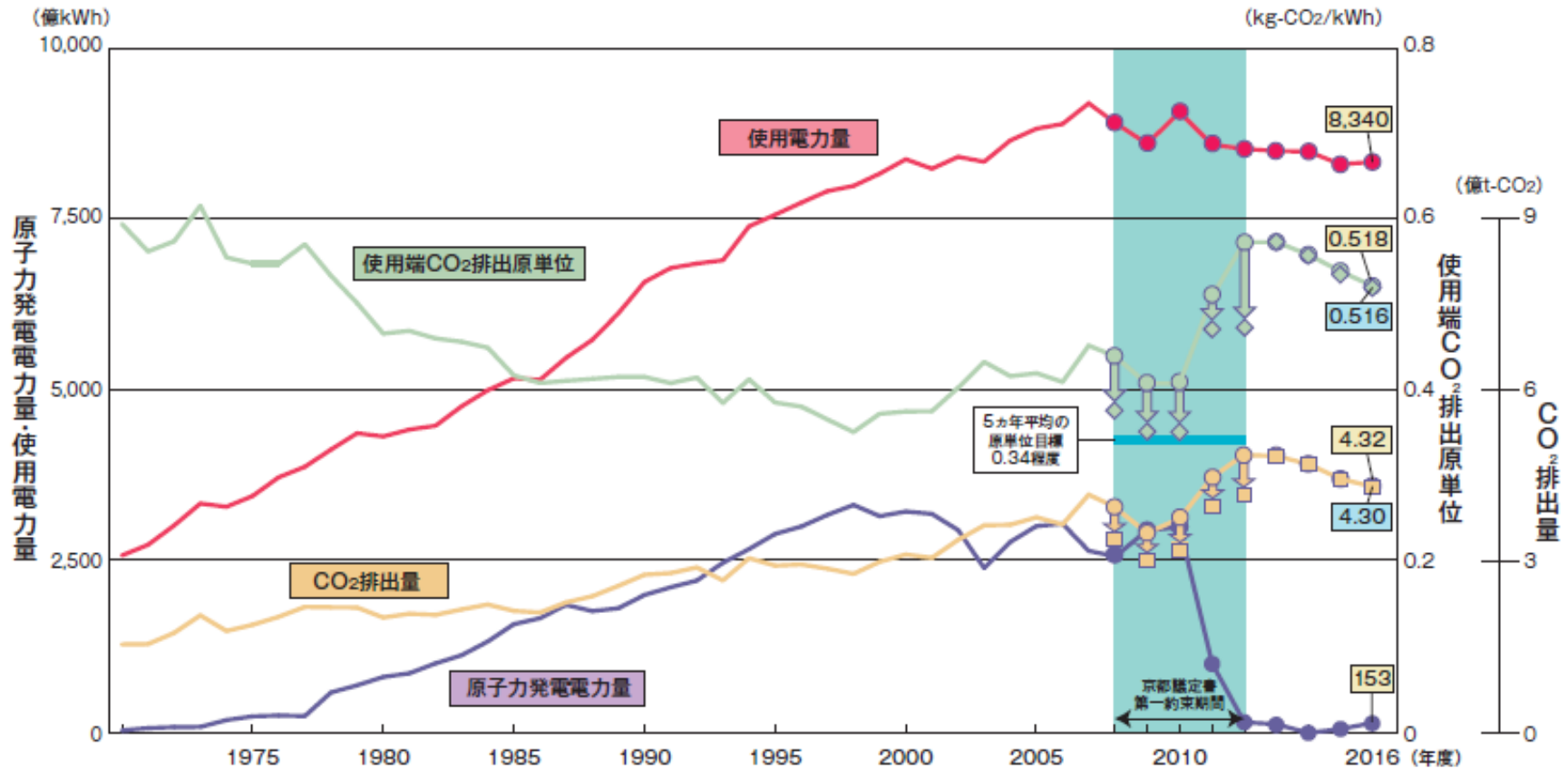
世界の一次エネルギー消費量の推移



(注) 四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある
()内は全体に占める割合

石油は今日までエネルギー消費の中心となってきた。発電用を中心にほかのエネルギー源への転換も進んだが、堅調な輸送用燃料に支えられ、石油消費量は1965年から2016年にかけて年平均2.1%で増加し、依然として全体で最大シェアを占めている。

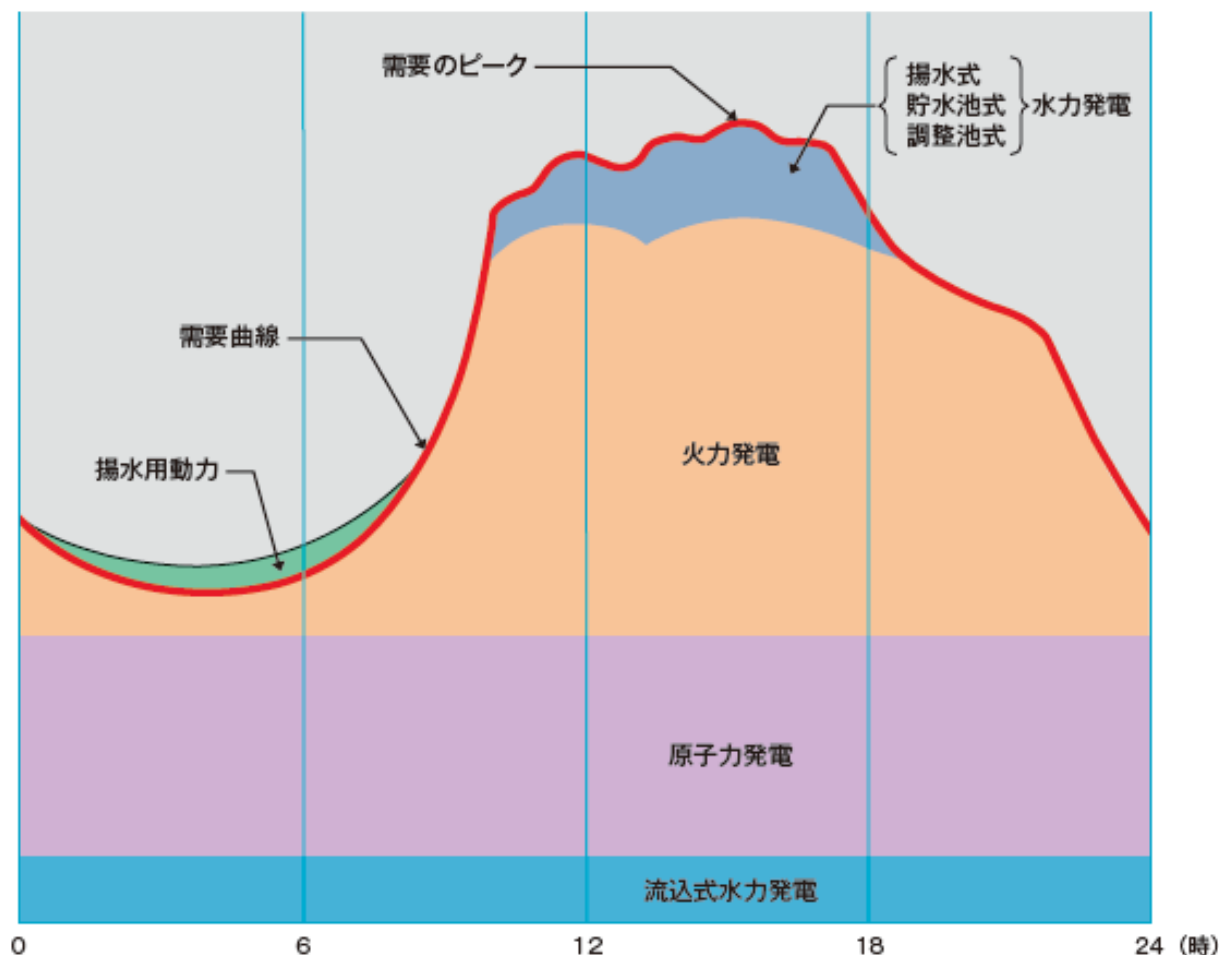
発電に伴うCO₂発生量の推移



(注) マーカー(◇、□)は、クレジットを反映した調整後使用端CO₂排出原単位および調整後CO₂排出量の実績を示す
 電気事業では、2008～2012年度の5ヵ年平均で1990年比20%程度低減(0.34kg-CO₂/kWh程度にまで低減)を目標に設定
 2014年度実績については、協議会としての実績は無いが、会員事業者の2014年度実績を合算したもの

❗ **原発の導入**により、発電時に発生するCO₂の割合は**減少**してきている。しかし、東日本大震災に伴う原発の長期停止により、火力発電量が増加し、2016年度の**使用端CO₂排出原単位**(クレジット反映後)は、0.516kg-CO₂/kWh。

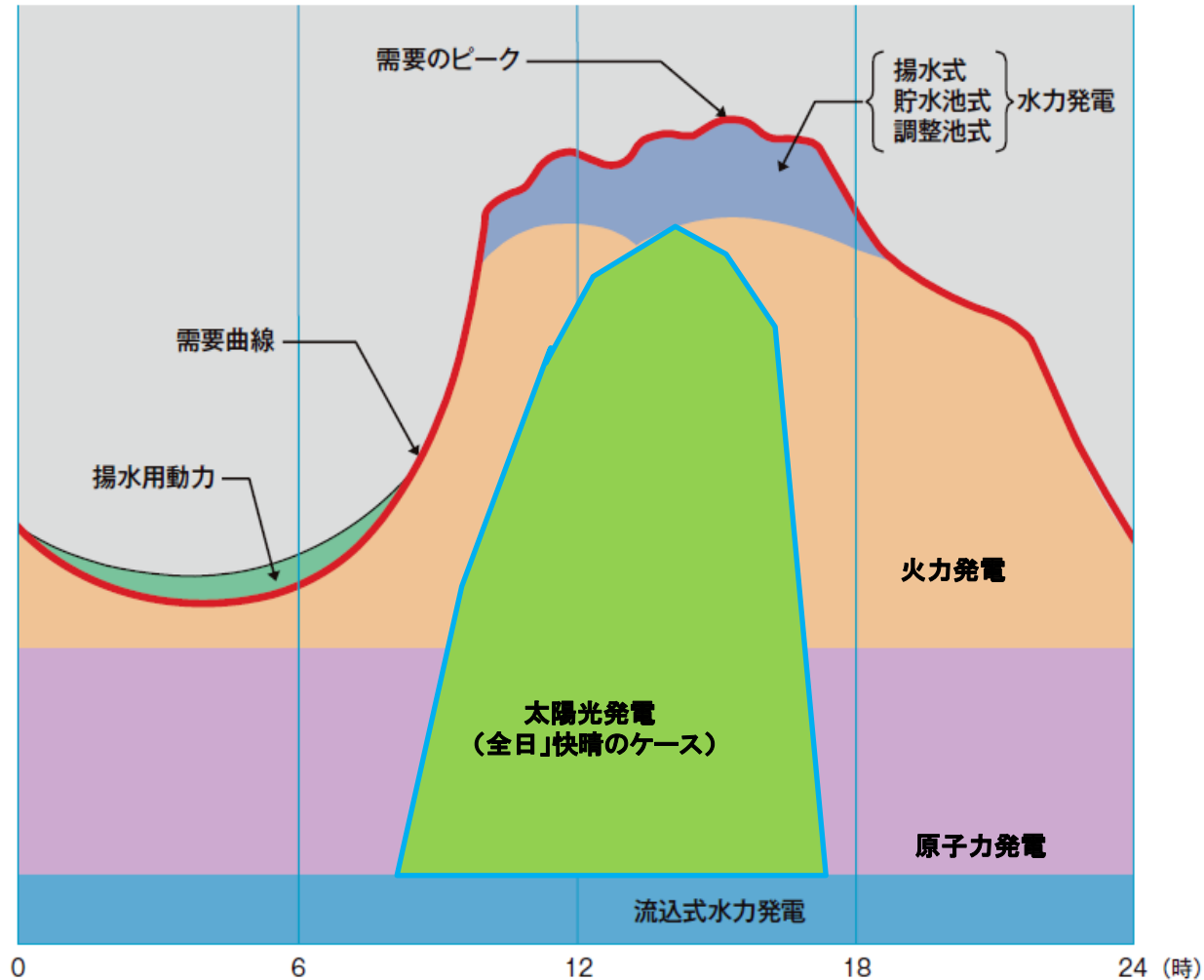
需要の変化に対応した電源の組み合わせ（例）



👤 エネルギー資源を輸入に頼る日本では、特定のエネルギー源に依存せず、各電源の特徴を生かした**バランス**が重要。

太陽光発電大量導入時代の電源の組合せ

太陽光発電がない時代の電源構成に大量導入時代の太陽光を追記した

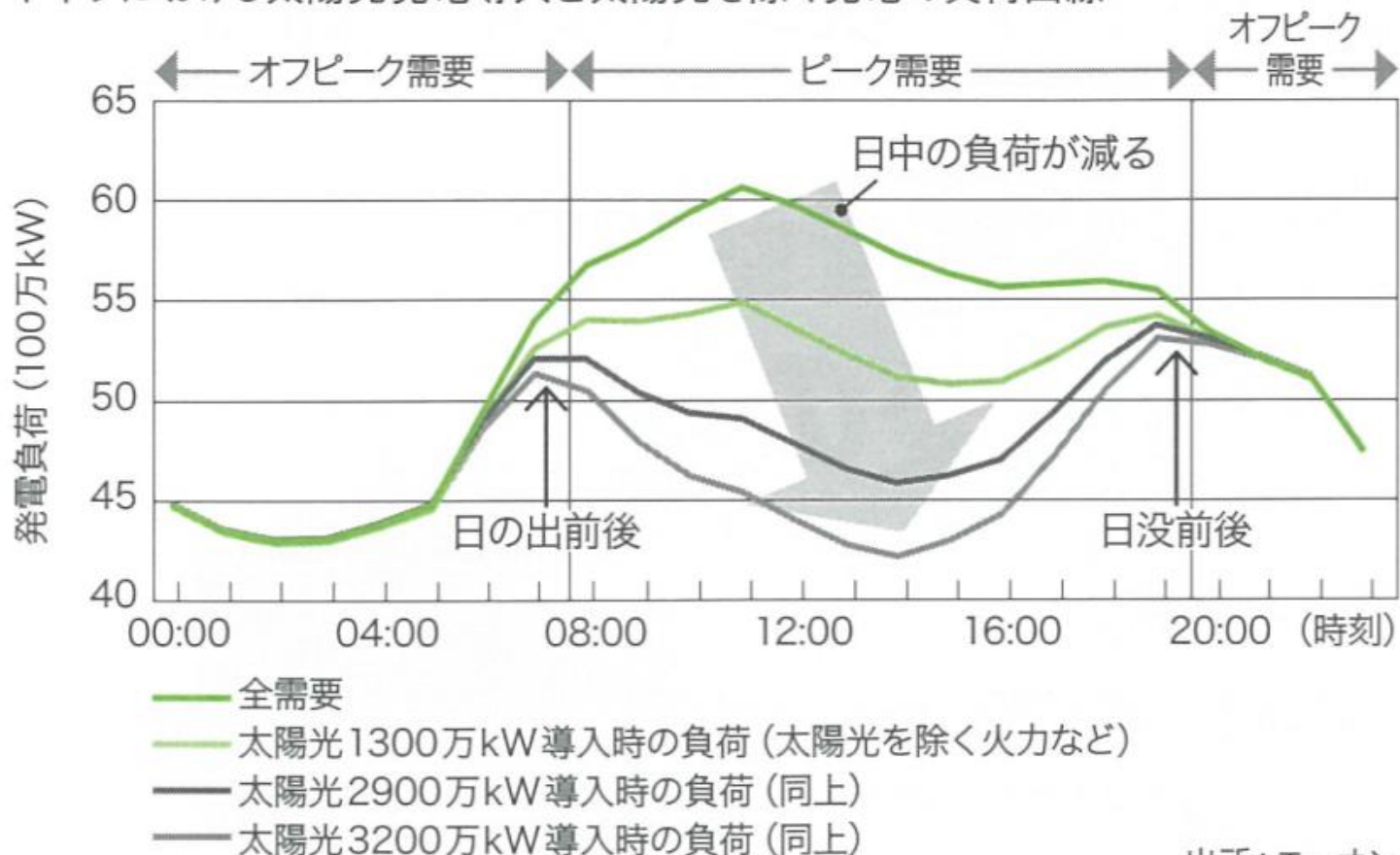


👤 太陽光発電の急な出力変動を補う新たな火力や蓄電設備が必要

太陽光発電導入量と太陽光を除く発電負荷

朝方と夕刻に負荷のピークがシフト **ダックカーブ**

ドイツにおける太陽光発電導入と太陽光を除く発電の負荷曲線



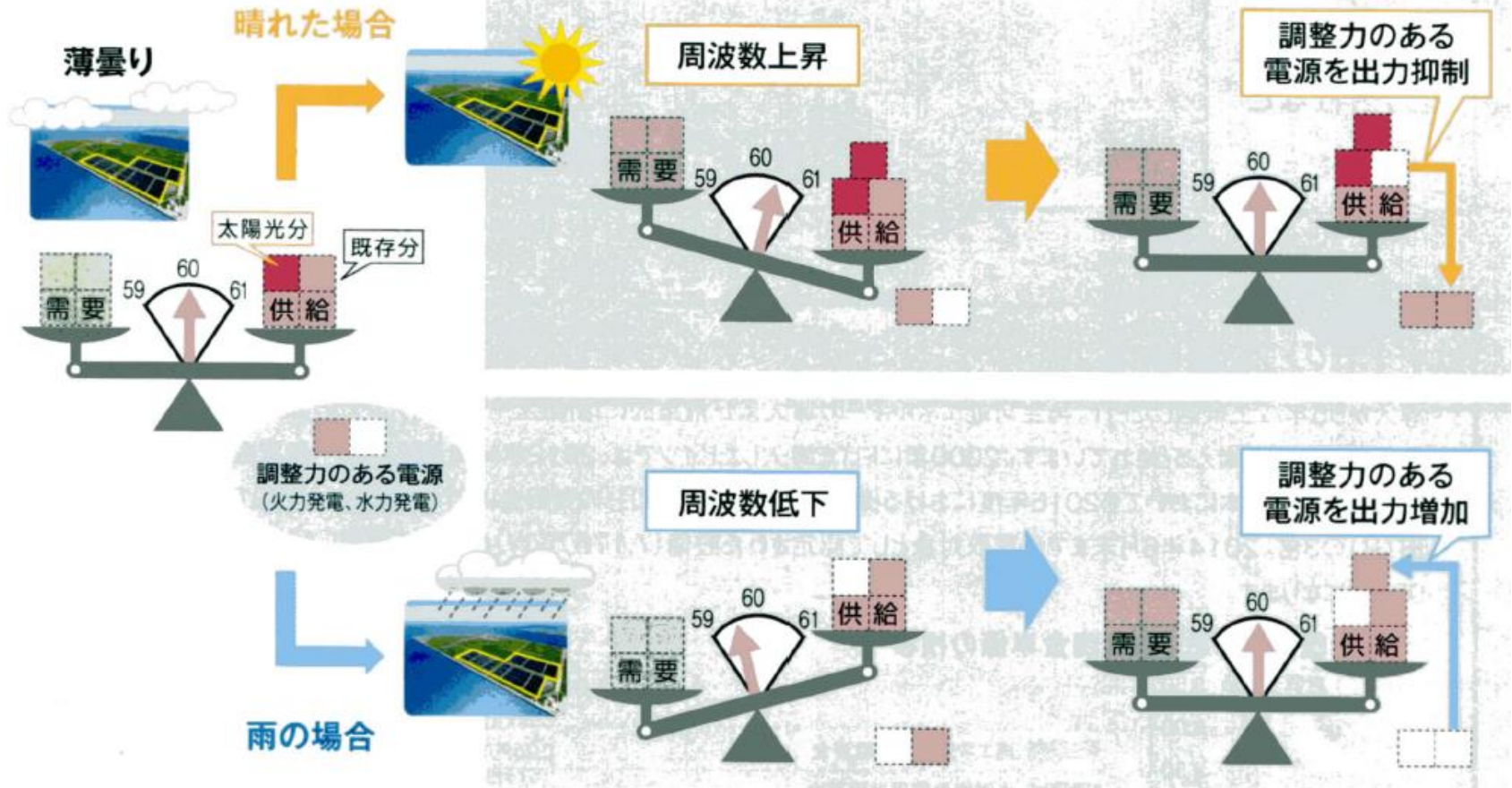
出所：エーオン

👤 太陽光発電の**急な出力変動**は、電気需要の少ない時期の**日の出**と**日没前後**の対応が難しい。(例. **北海道ブラックアウト**)

出典：日経エネルギーNext2015.1, 2015.8, 2015.9

火力・水力発電が太陽光発電の出力変動に対応

■天候による周波数の変化



⚠ 電力の供給量は需要に合わせないと、周波数や電圧が変動し、送配電が停止する恐れがある。(例. 北海道ブラックアウト)

需給バランス調整・周波数維持について

電源システムの技術課題

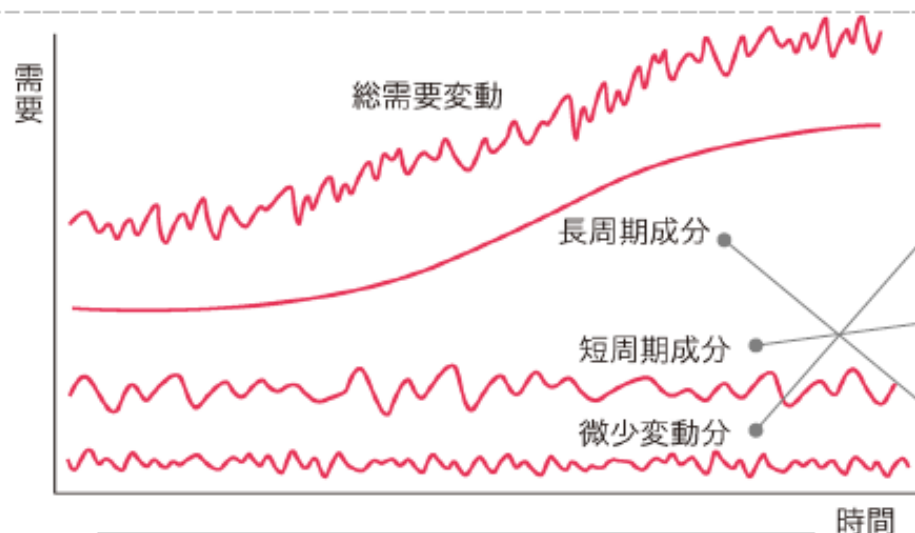
- 送配電事業者は「発電機の調整力」を利用して、時々刻々、需要と発電機出力のずれを一定範囲に抑えるように、需給バランス調整・周波数維持を行っている。
- 上記実現のため、先般の託送供給等約款（系統連系技術要件）改定において、発電機への調整機能の具備を求め、認可されたところ。

●変動周期

- ～数十秒程度（下図の微小変動分に相当）
- ～数分程度（下図の短周期成分に相当）
- ～数十分程度（下図の長周期成分に相当）

●対応する発電機調整機能

- ⇒ ガバナフリー（GF）
- ⇒ 自動周波数制御（LFC/AFC）
- ⇒ 運転基準出力制御（DPC）



（出典）NEDO再生可能エネルギー技術白書

I) ガバナフリー（GF）

系統周波数の変動に対応するため、タービンの調速機（ガバナ）により、自動的に発電機出力を制御

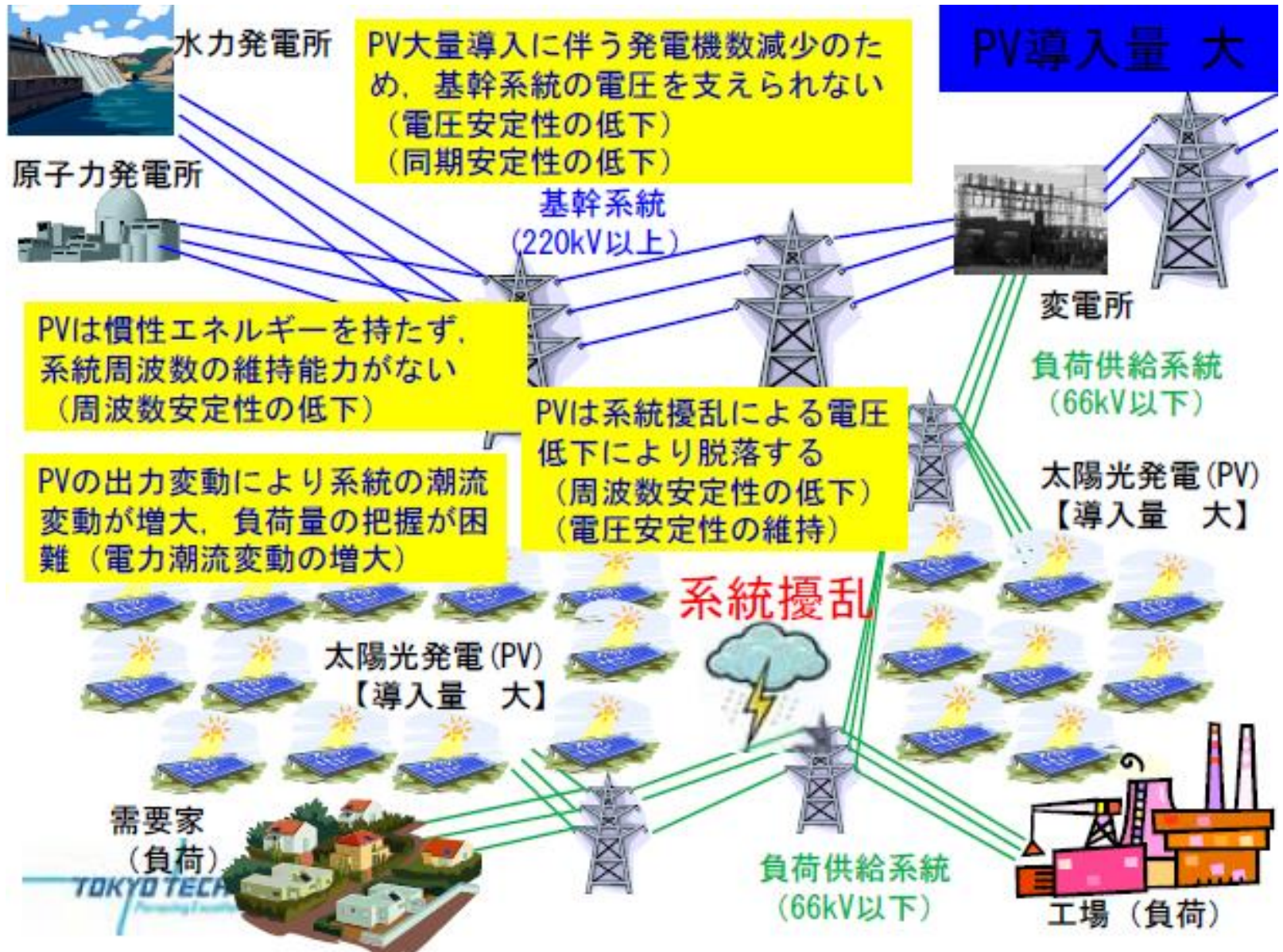
II) 自動周波数制御（LFC/AFC）

ガバナフリーでは対応しきれない変動に対応するため、当社から送信される制御信号に従い発電機出力を制御

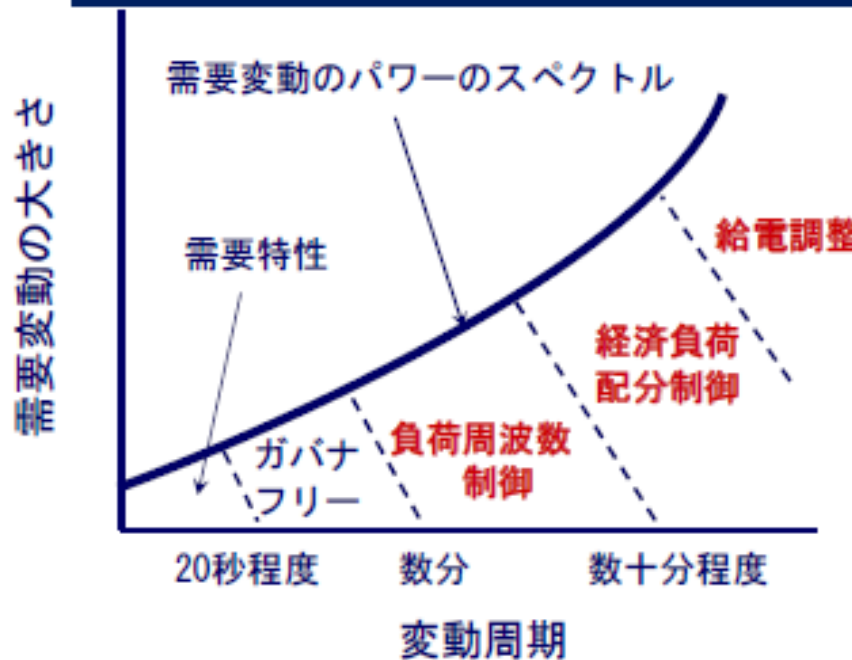
III) 運転基準出力制御（DPC）

自動周波数制御では対応しきれない変動に対応するため、当社から送信される出力指令値に発電機出力を制御

再生可能エネルギー導入拡大の電源系統への影響



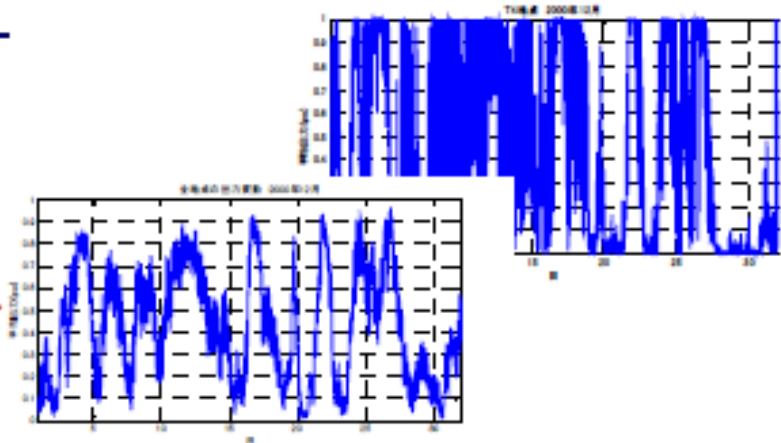
需給制御と平滑化効果



[平滑化効果]

風, 日射は確率的に変動
→たくさんあればバラバラに動くため, 総合的に見た変動は小さく

短周期変動の方が長周期変動よりも平滑化が効く



再生可能エネルギー導入拡大に伴う技術課題

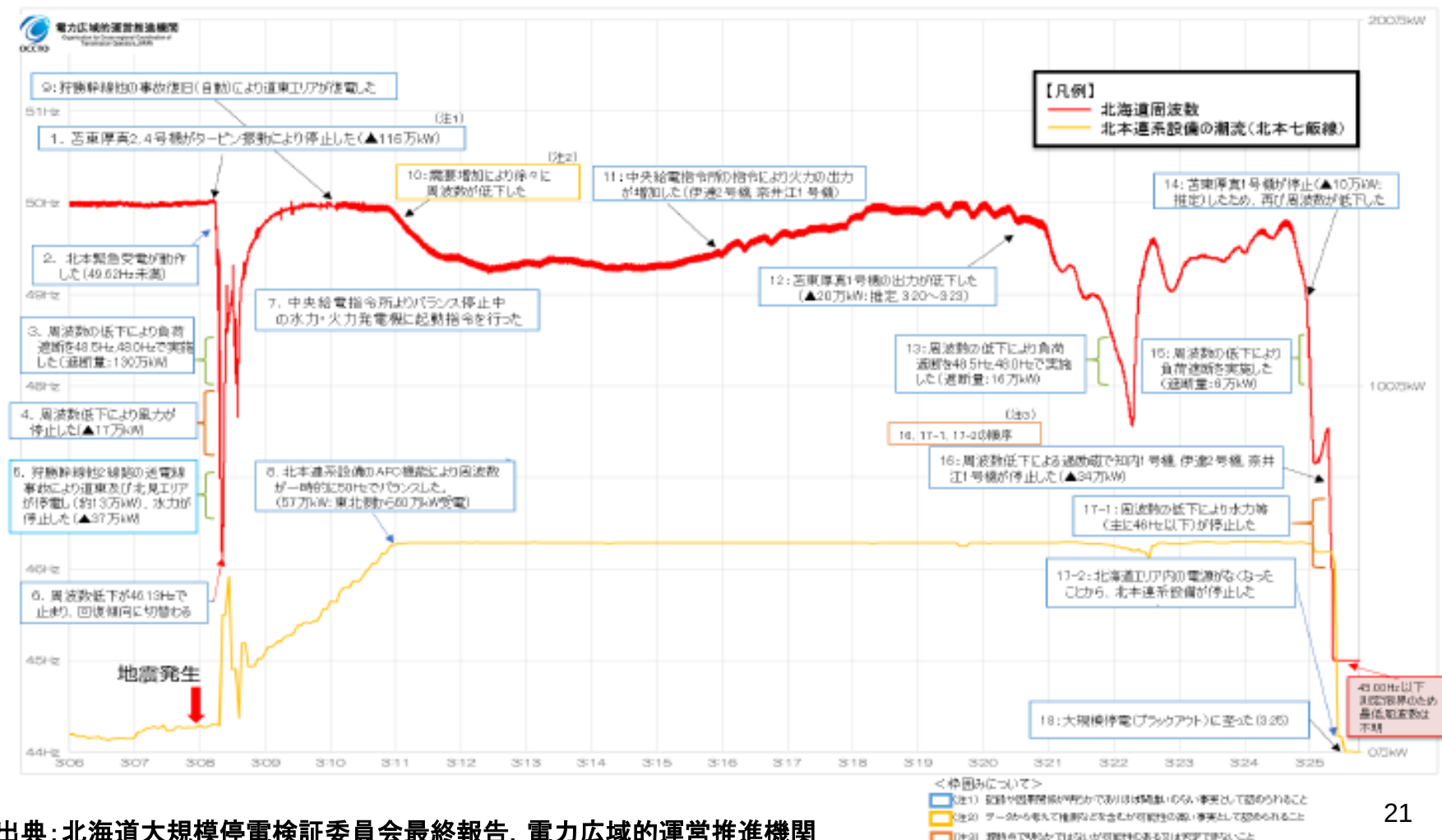
- 再生可能エネルギーの導入拡大には、電力品質(電圧、周波数)の維持に必要な調整力やバックアップ電源の確保に加え、送電線等のネットワーク設備形成などの課題が存在。

課 題		対応策(例)
①	急激な出力変動に対する 周波数調整力の不足	➢ 出力変動の調整やバックアップのための電源確保(火力・揚水発電等) ➢ 各種蓄電池の活用
②	ベース供給力と再生可能エネルギーの 合計発電量が需要を上回ることによる 余剰電力の発生	➢ 揚水発電、地域間連系線の活用 ➢ 再生可能エネルギーの出力抑制 ➢ 各種蓄電池の活用 ➢ 軽負荷期の需要創出
③	ご家庭等の太陽光発電から系統側への 電気の流入(＝逆潮流)が増加すること による系統電圧の上昇	➢ 柱上変圧器の分割設置、電圧調整装置の設置、バンク逆潮流対策 ➢ ご家庭内での電力消費
④	電力需要が少ないエリアでの系統接続 の増加による送電容量の不足	➢ 送変電設備の整備、増強

Ⅱ. 地震発生からブラックアウトに至る経緯について

- 地震発生からブラックアウトに至るまでの間に発生した事象を明らかにし、周波数変動を説明。
- 一部に推測を含むが概ね全ての事象はほぼ間違いのない事実として確認。一連の事象は需要と供給のバランスで生じる周波数変動で説明できる。

本検証委員会により事実認定が行われた事象



中国の原子力発電所建設が急ピッチ

中国で建設された**4基のAP1000**がすべて**完成(2018年)**



世界初、三門1号機が営業運転
(9月21日)



世界で2基目、海陽1号機が営業運転
(10月24日)

米国初のAP1000建設計画、予算の増加で頓挫の危機に(原産新聞9月26日)

最新鋭の第3世代炉である**仏フラマトム社製**・欧州加圧水型炉(EPR)と**米WH社製**・AP1000の初号機が、6月末に中国で初送電(原産新聞9月26日)

商業用**再処理工場**計画の年内開始に向けニュー・アレバ社と覚書(原産新聞1月9日)

中国、福建省・霞浦で**60万kWの高速実証炉を本格着工**(原産新聞1月9日)

人 中国の商業用原子力発電設備は39基。3, 780万kWに到達しており、基数では日本と並び**世界第3位**。年内にも基数・容量ともに日本の開発規模を**追い抜く見通し**(原産新聞7月7日)

ロシアの高速炉発電所建設



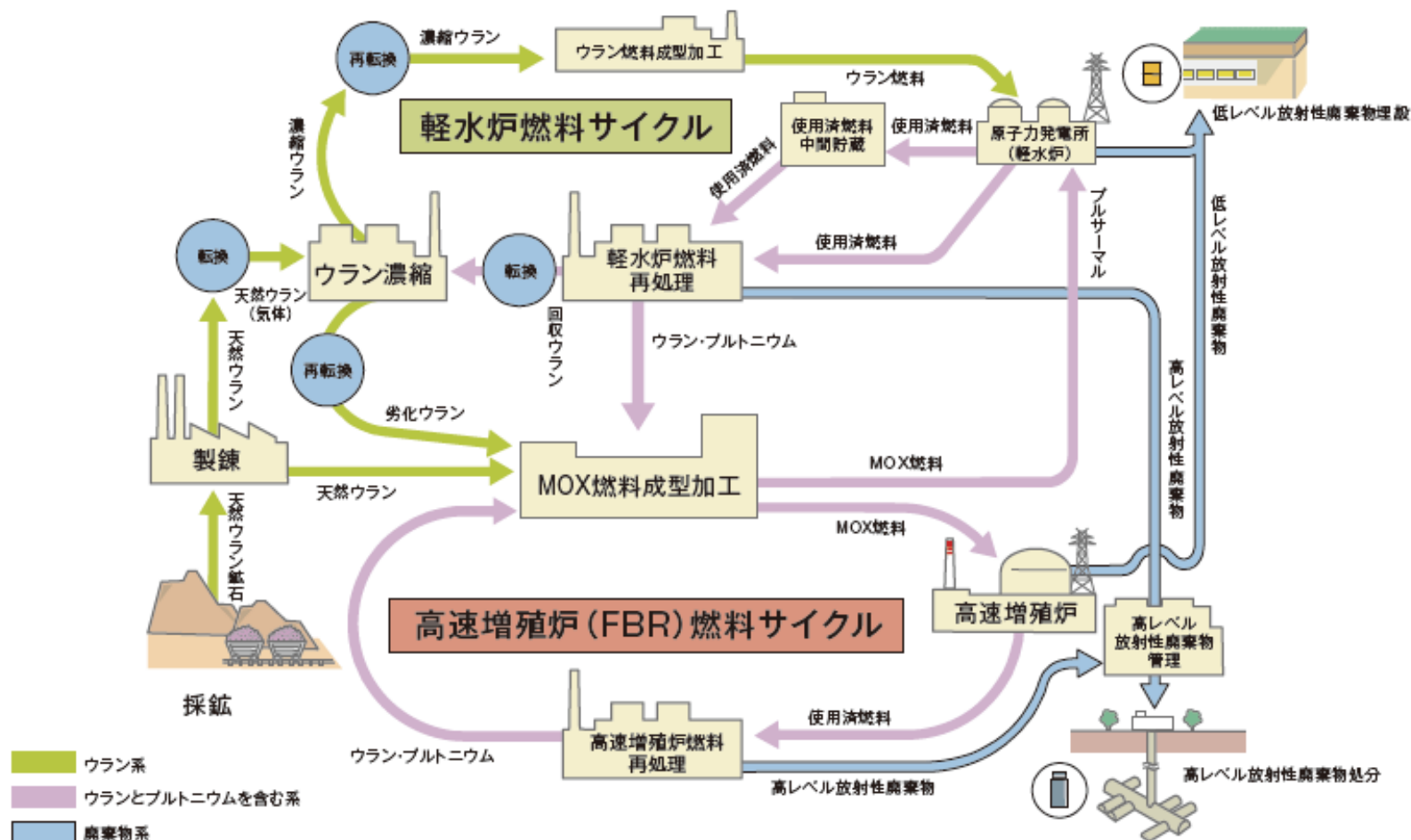
現在運転中のベロヤルスク4号機
(BN-800)

今年8月3日に計画中的ナトリウム冷却**高速炉**BN-1200(120万kW)の**建設工程**を明らかにした。

	原子炉名	kWe	サイト	備考(冷却材、初臨界、運転状況など)
運 転 中	BOR-60	1.2万	ディミトロフグラード	Na、ループ型、1969年初臨界
	BN-600	60万	ベロヤルスク	Na、タンク型、1980年初臨界、1981年営業運転開始、運転中
	BN-800	80万	ベロヤルスク	タンク型、MOX燃料を本格利用、2014年初臨界、2016年営業運転開始
計 画 中	BN-1200	120万	ベロヤルスク	ベロヤルスク5号機として建設予定(将来は南ウラルにも建設予定)
	BREST-300	30万	セベルスク	Pb冷却、2018年建設開始予定、2025年運転開始目標
	SVBR-100	10万	ディミトロフグラード	Pb-Bi冷却、小型モジュール炉、2020年完成目標(遅延の見込み)

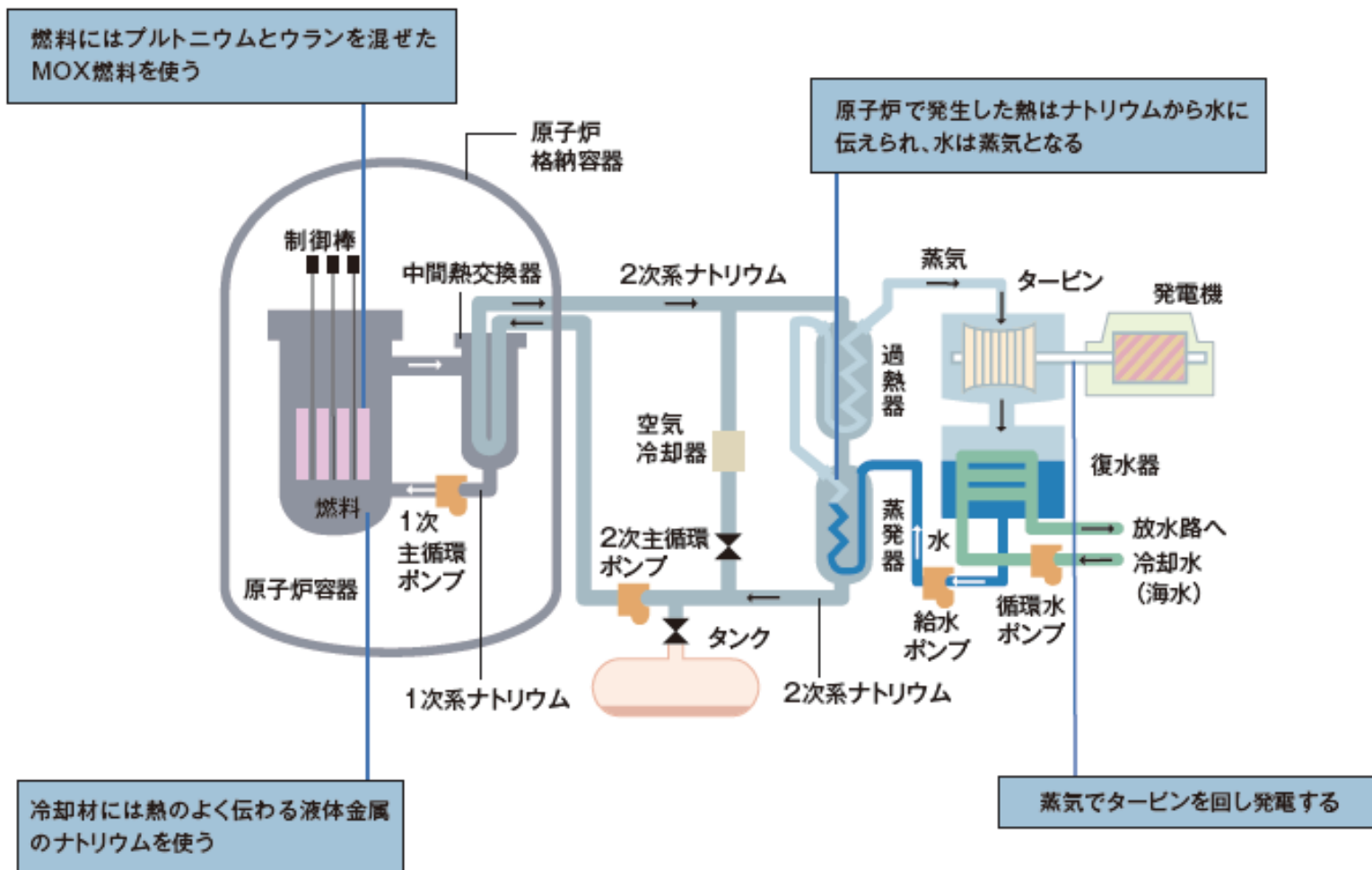
 ロシアは、原子力開発当初から、エネルギー問題解決の鍵として、**核燃料サイクル**の完結と**高速炉**の開発を積極的に進めている(表参照)。

原子燃料サイクル(FBRを含む)



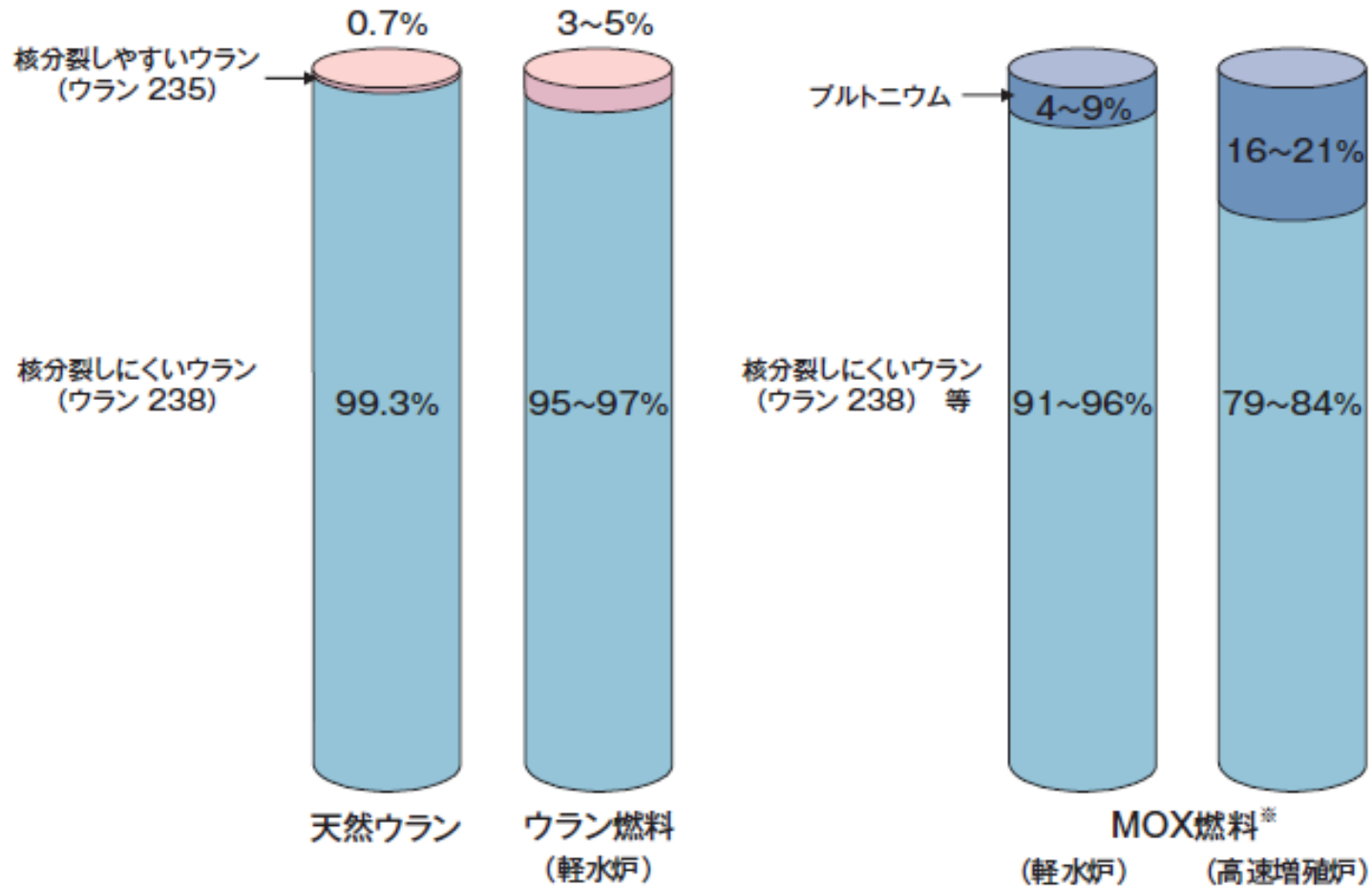
- 使用済み燃料の中には、燃え残りのUや新たに生まれたPuがあり、これらを回収して再び燃料として使う。軽水炉ではU235だけでなく、高速中性子によりU238も核分裂し、中性子を吸収して核分裂するPu239が生成。出力の30～40%はPuの核分裂。

高速増殖炉(FBR)の仕組み



👤 Puを直接燃料に使用できる。**冷却材**はNaを使用し、原子炉内の熱をNaを通じて水に伝え蒸気が発生。軽水炉との**違い**は、核分裂に寄与する**中性子**(高速, 熱), **燃料**(MOX, U), **冷却材**(Na, 水), 発電**効率**(34.5%, 39%)及び**転換比**。

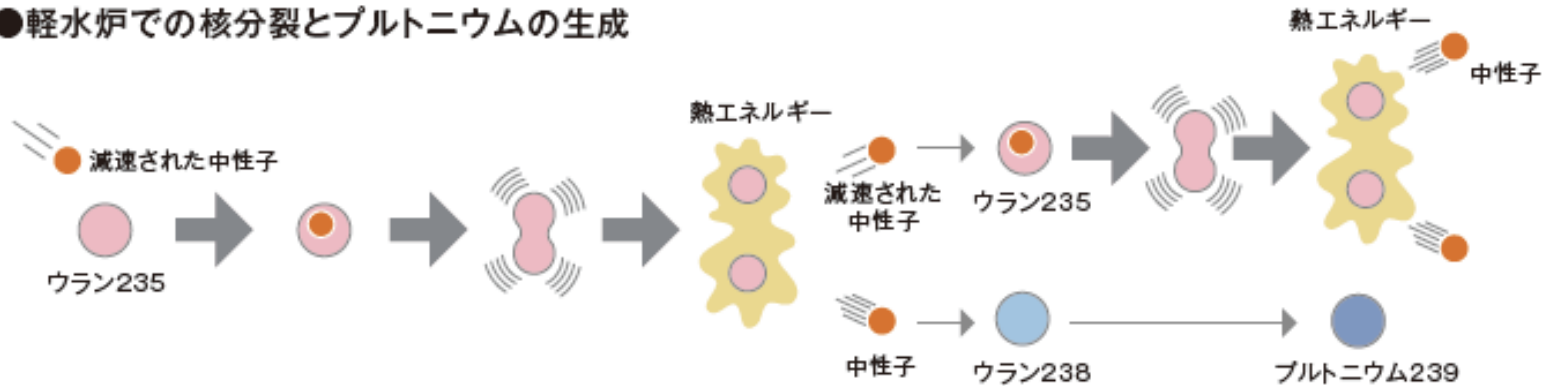
混合酸化物(MOX)燃料



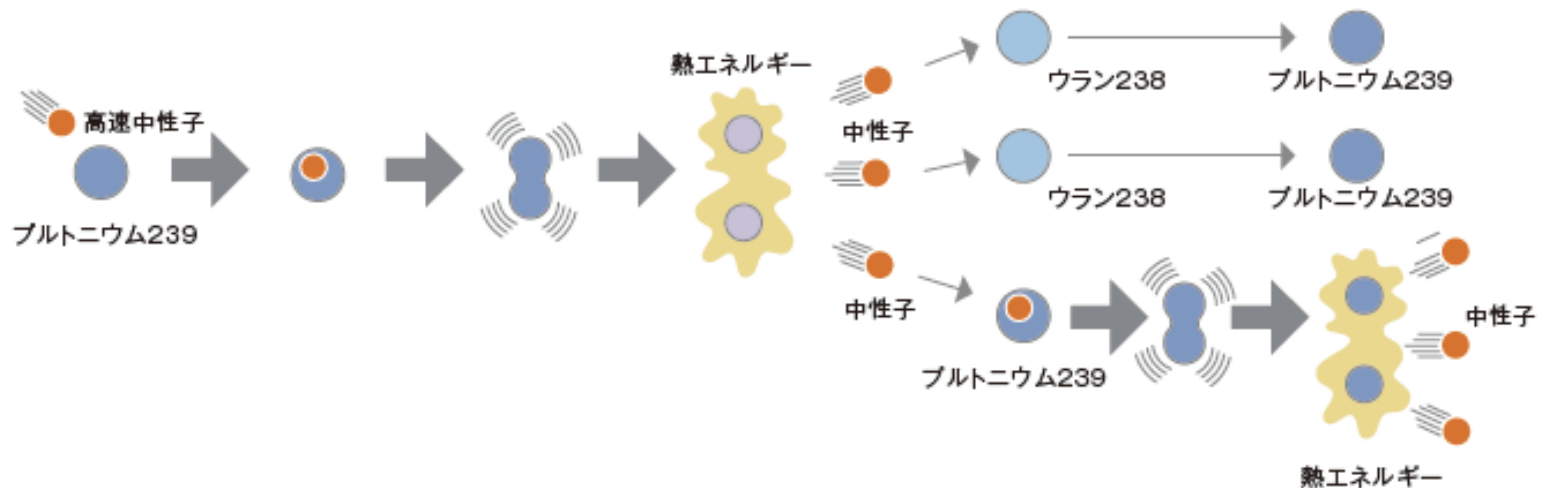
UとPuを酸化物(粉末)を混合してつくったMOX燃料は、軽水炉の**プルサーマル**計画や**高速増殖炉**等の燃料に利用。PuはUに比べ**中性子を吸収し易い**ので、制御棒の**効き**を低下し、燃料**出力**を上昇させる。炉内配置の工夫等で、**炉心の1/3**までU燃料並み。Puは**生もの**(同位体比が変化し易い)。対してU燃料は原始放射性物質で**長半減期**。

ウランの核分裂とプルトニウムの生成・核分裂

●軽水炉での核分裂とプルトニウムの生成

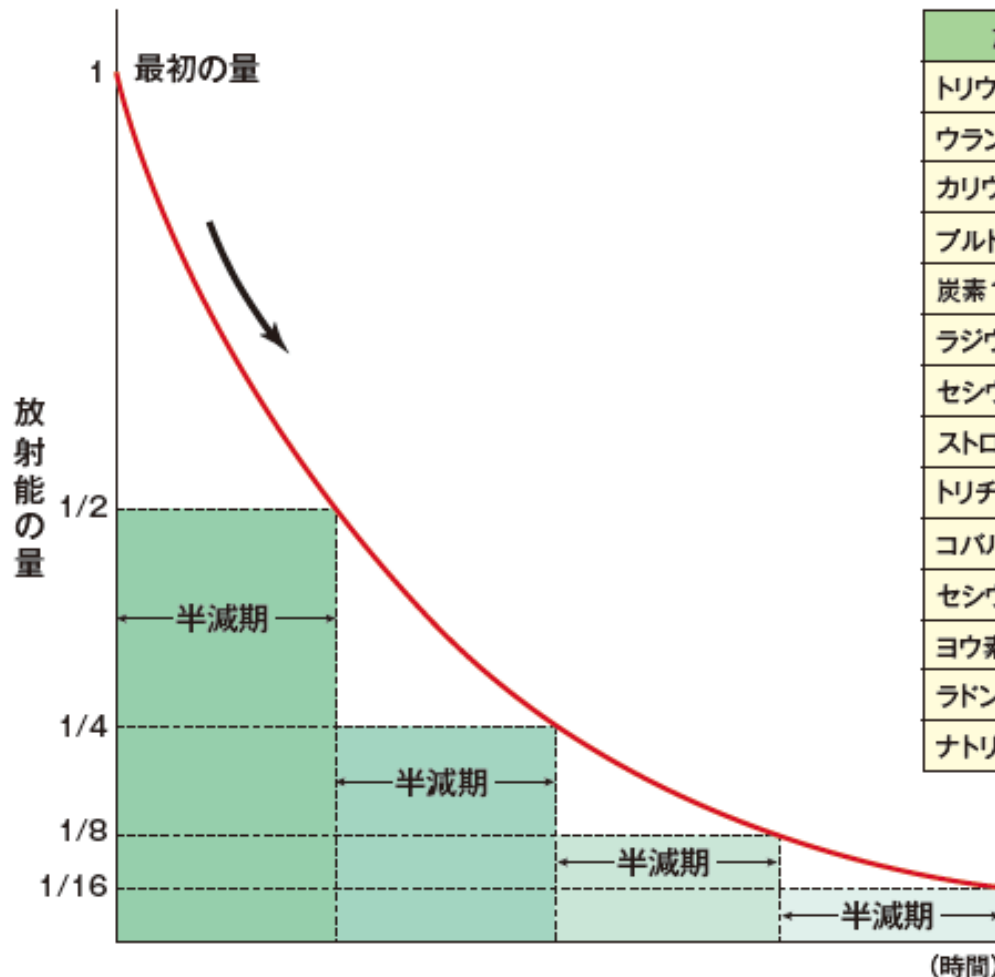


●高速増殖炉での核分裂とプルトニウムの生成(増殖)



🧑 **U238**の存在比は**99.3%**で、核反応断面積×存在比ぐらいの物質生成の効果がある。

放射能の減り方

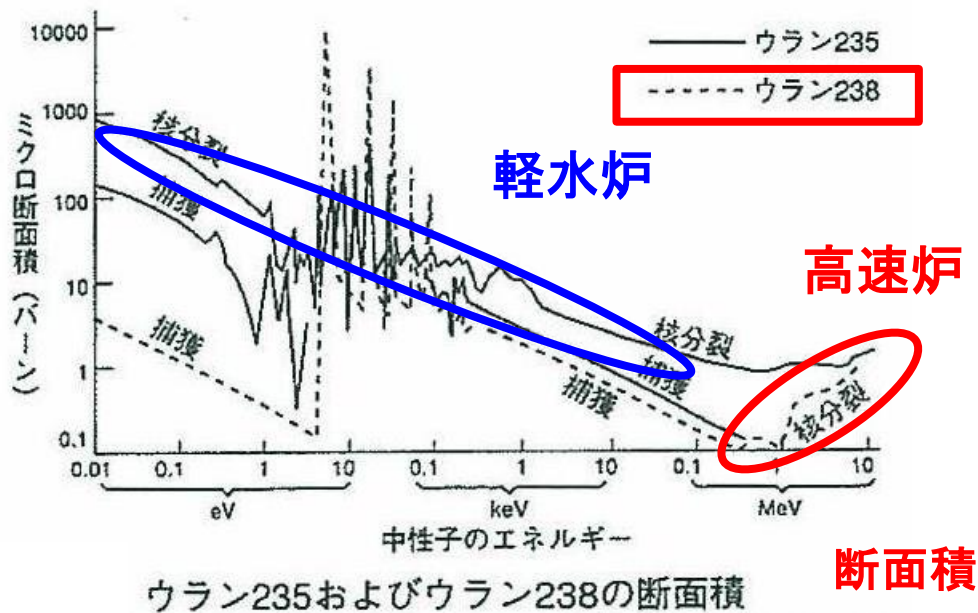


放射性物質	放出される放射線*	半減期
トリウム232	$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$	141億年
ウラン238	$\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$	45億年
カリウム40	$\beta \cdot \gamma$	13億年
プルトニウム239	$\alpha \cdot \gamma$	2.4万年
炭素14	β	5,700年
ラジウム226	$\alpha \cdot \gamma$	1,600年
セシウム137	$\beta \cdot \gamma$	30年
ストロンチウム90	β	28.8年
トリチウム	β	12.3年
コバルト60	$\beta \cdot \gamma$	5.3年
セシウム134	$\beta \cdot \gamma$	2.1年
ヨウ素131	$\beta \cdot \gamma$	8日
ラドン222	$\alpha \cdot \gamma$	3.8日
ナトリウム24	$\beta \cdot \gamma$	15時間

※壊変生成物(原子核が放射線を出して別の原子核になったもの)からの放射線も含む

🧑 Th, U, Kは原始放射性物質。半減期 Pu238:87.7年, Pu240:6563年, Pu241:14.35年, U235:7.04億年

資源量からみた高速増殖炉の必要性



資源量が大幅増

U-238 (天然存在比 993%)
が核分裂

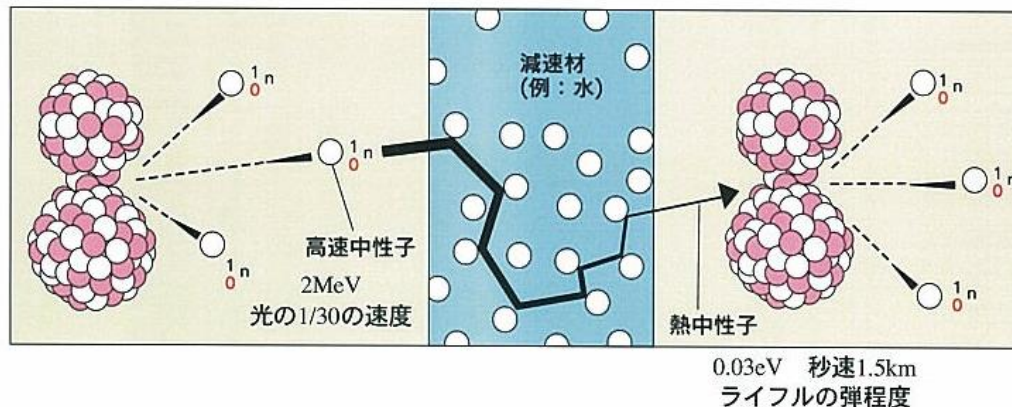


安全性を長期間維持

経済性が高い(長期使用)

高速炉

軽水炉



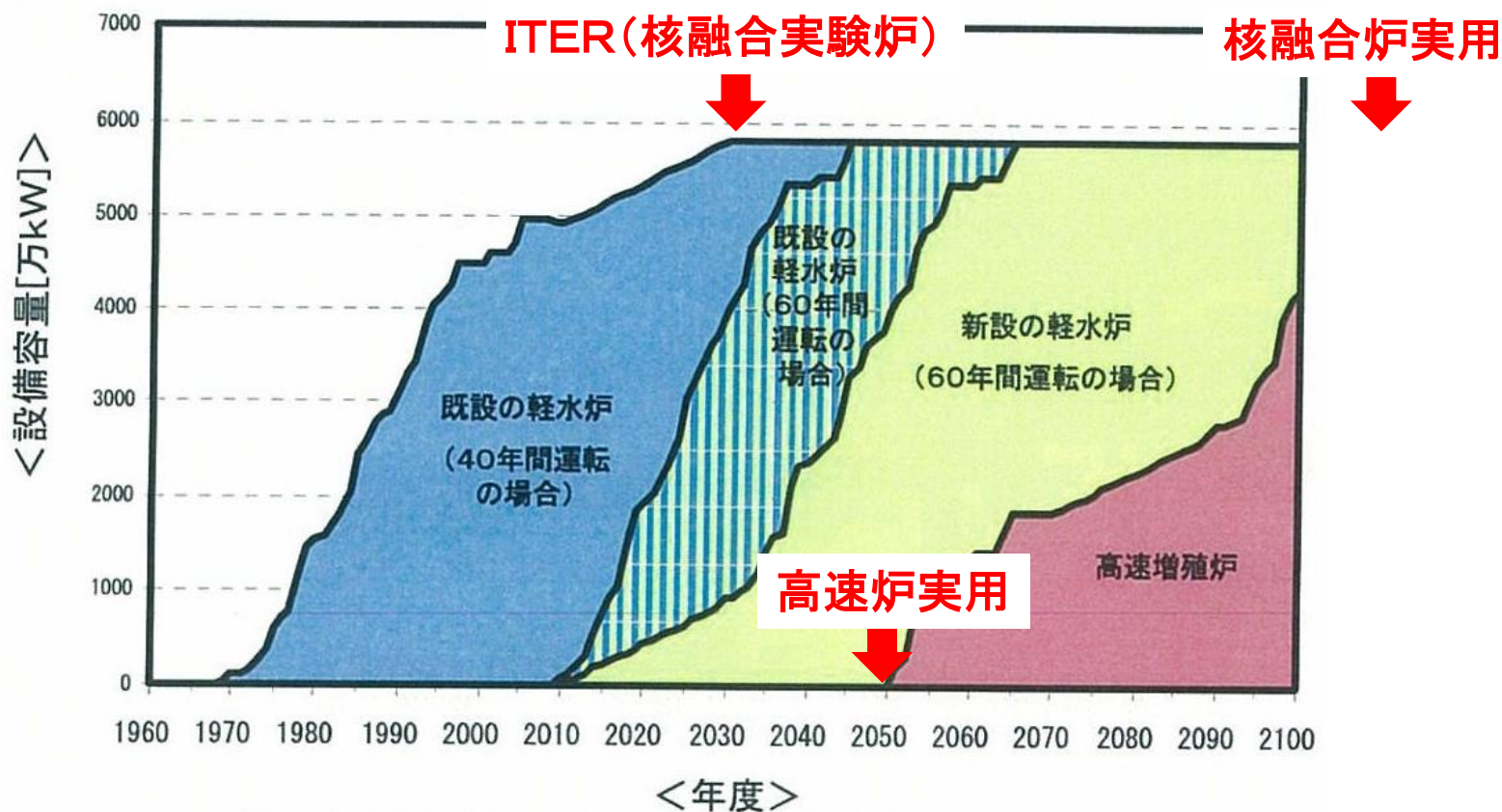
中性子利用効率が向上

高速炉の方が中性子を
有効利用

今後の原子力 福島第一事故前の計画

既存軽水炉 ⇒ 新設軽水炉 ⇒ 高速炉(FBR) ⇒ 核融合
再処理 ⇒ 分離技術① ⇒ レアメタル回収 FBR ⇒ 核変換②
①② ⇒ 廃棄物短半減期化 Pu燃料はAmに変化(生もの)

核融合実験炉 ITER 2030年目標 水素製造:高温ガス炉

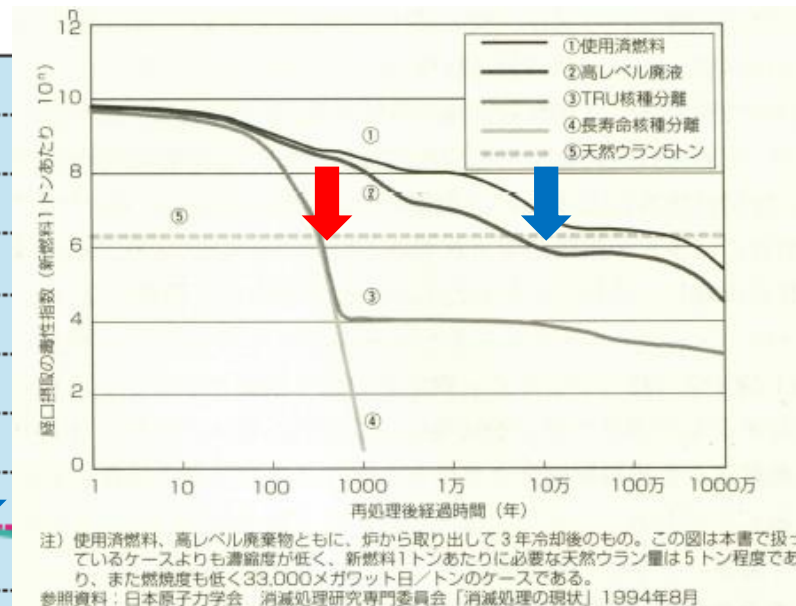
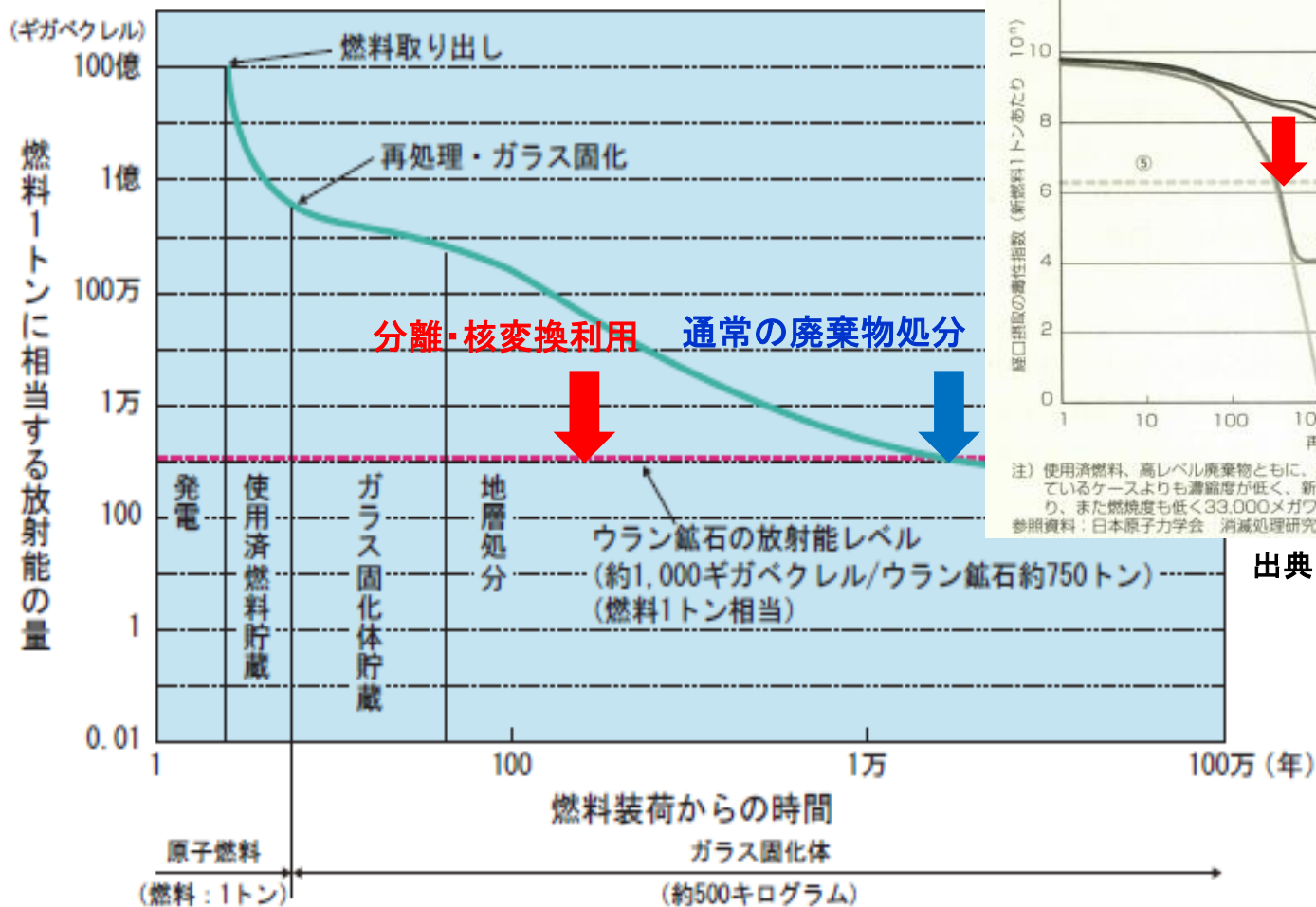


(新計画策定会議(第21回)資料第1号「エネルギー政策における原子力発電」より)

放射性廃棄物の短半減期化

分離・核変換技術 → 高レベル廃棄物の短半減期

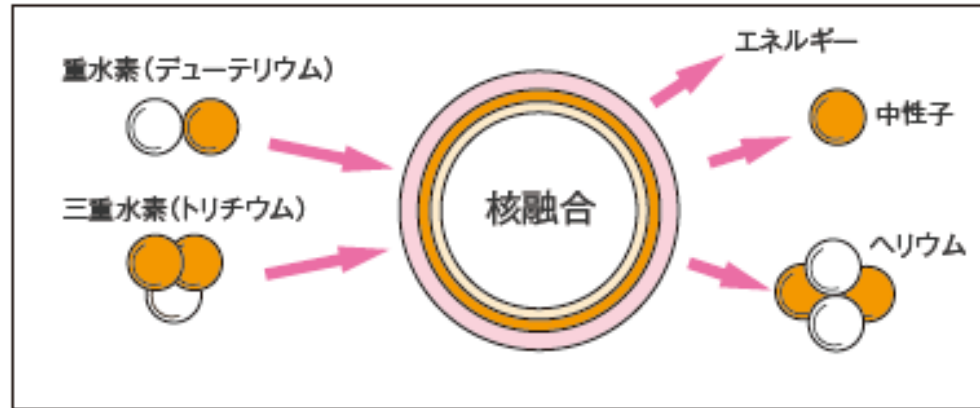
分離 → 高レベル廃棄物からレアメタル等を回収



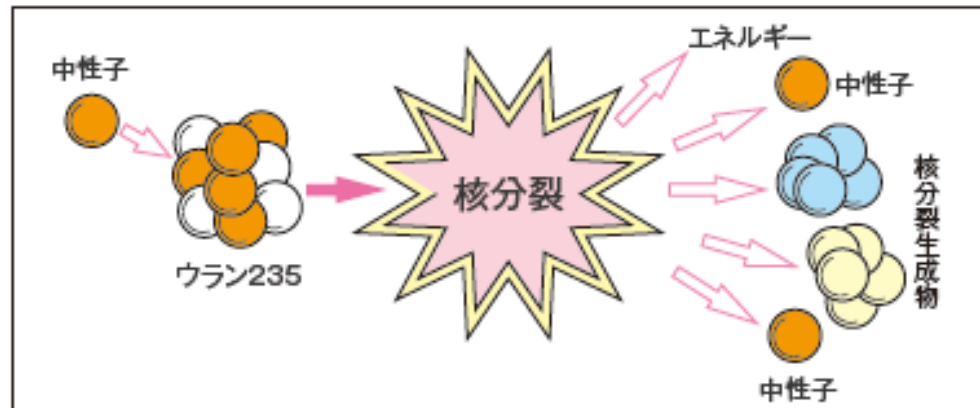
出典: 核燃料サイクル, 藤家, 石井

核融合と核分裂

核融合の原理



核分裂の原理



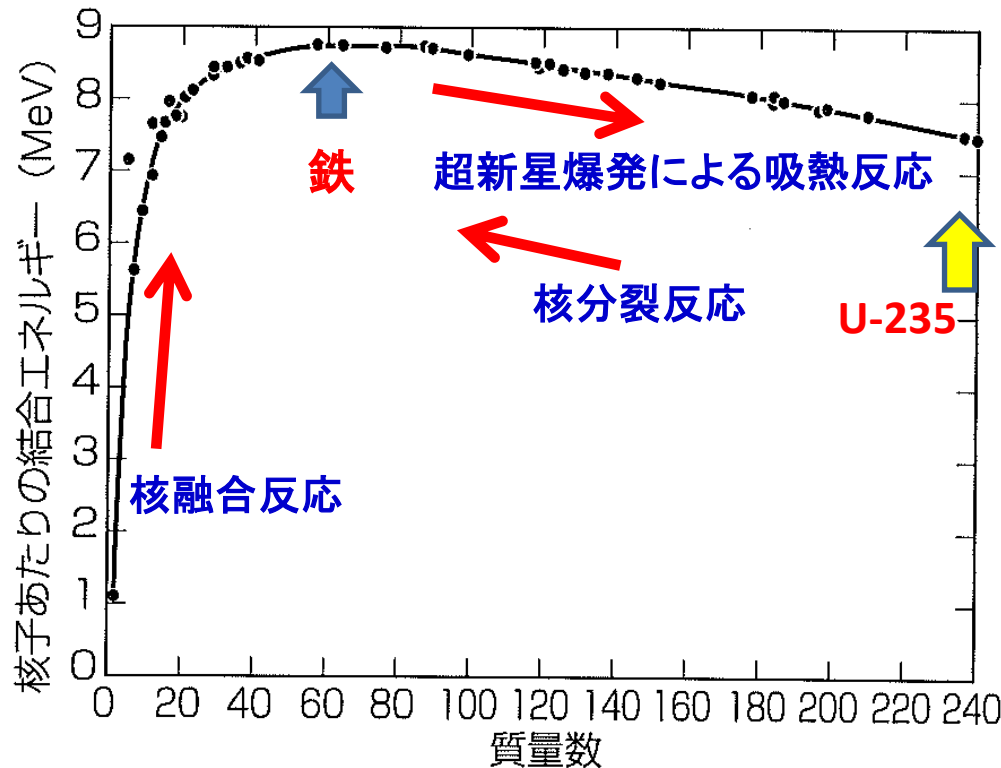
- 将来期待できる大規模なエネルギー源として**核融合**がある。これは、**ウラン**などの**質量数の大きな物質の核分裂**と異なり、トリチウムやヘリウム等の**質量数が小さい物質の原子核を融合**させ、その際に生じるエネルギーを利用するものである。

宇宙のエネルギー 水素からの物質生成

太陽光発電の大量導入時代に必要な蓄エネ手段の一つが「水素」

元素の中で核子の結合エネルギーが最も大きく安定している鉄が作られるとエネルギー生成のプロセスは止まってしまう

鉄よりも重い元素は普通にはできず、吸熱反応が起こる大きなエネルギー（超新星爆発）が必要



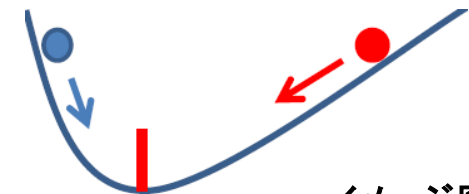
超新星爆発エネルギーで中性子吸収・過剰

⇒ β 崩壊(電子放出)

⇒中性子が陽子へ変わる
(原子番号が一つ増)

超新星爆発という莫大なエネルギーを「質量」という形で貯蔵

⇒「核分裂」はそれを解放するもの



イメージ図

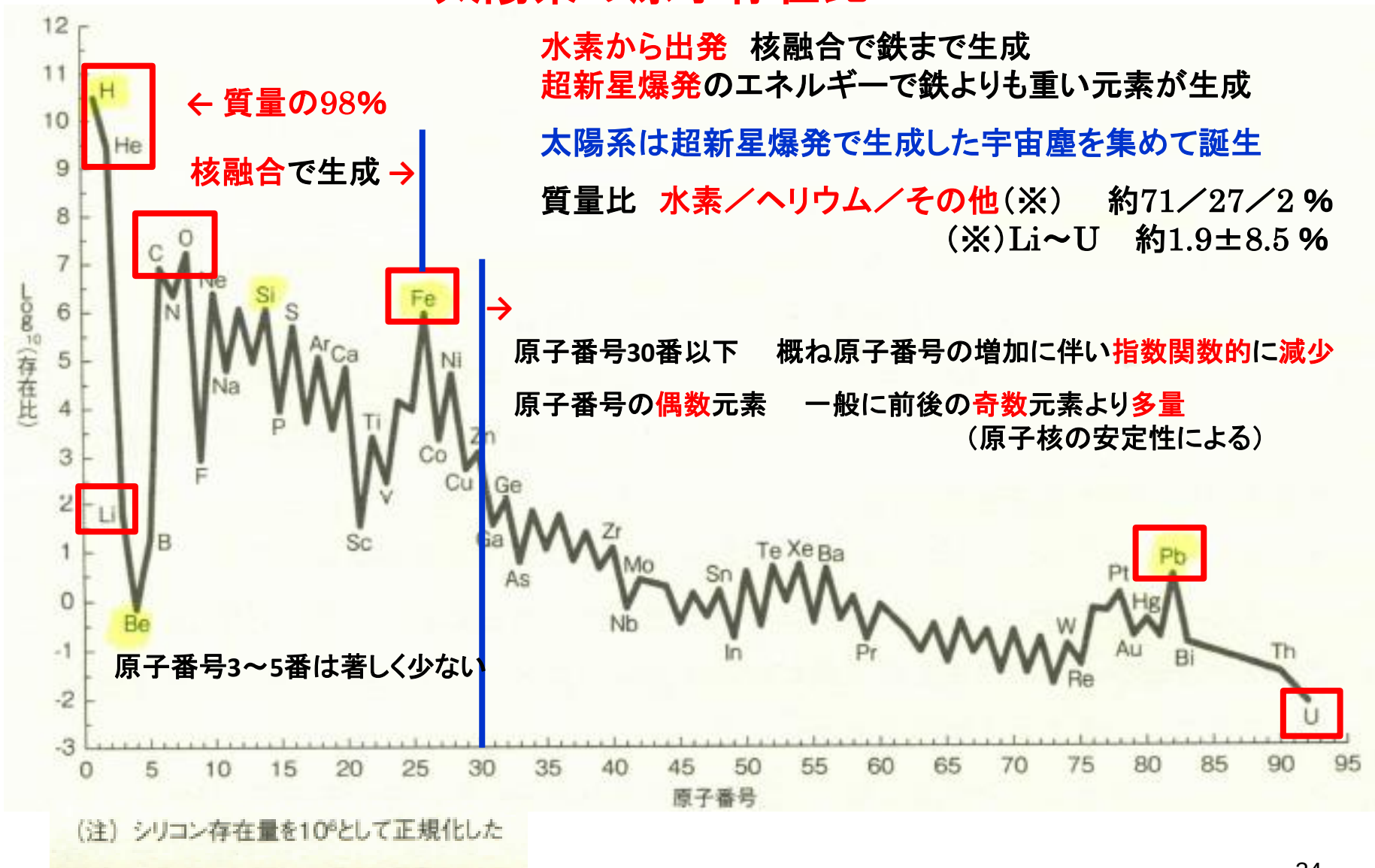
図1-7 質量数に対する核子あたりの平均結合エネルギー

(出典：ジェームスJ. ドウデルスタット、ルイスJ. ハミルトン(著)、成田正邦、藤田文行(訳)、「原子炉の理論と解析(上)」、現代工学社(2001))

核子エネルギーと物質生成

太陽系にある物質 水素とヘリウムが主成分

太陽系の原子存在比



エネルギーミックスで考慮すべきこと

お疲れ様でした