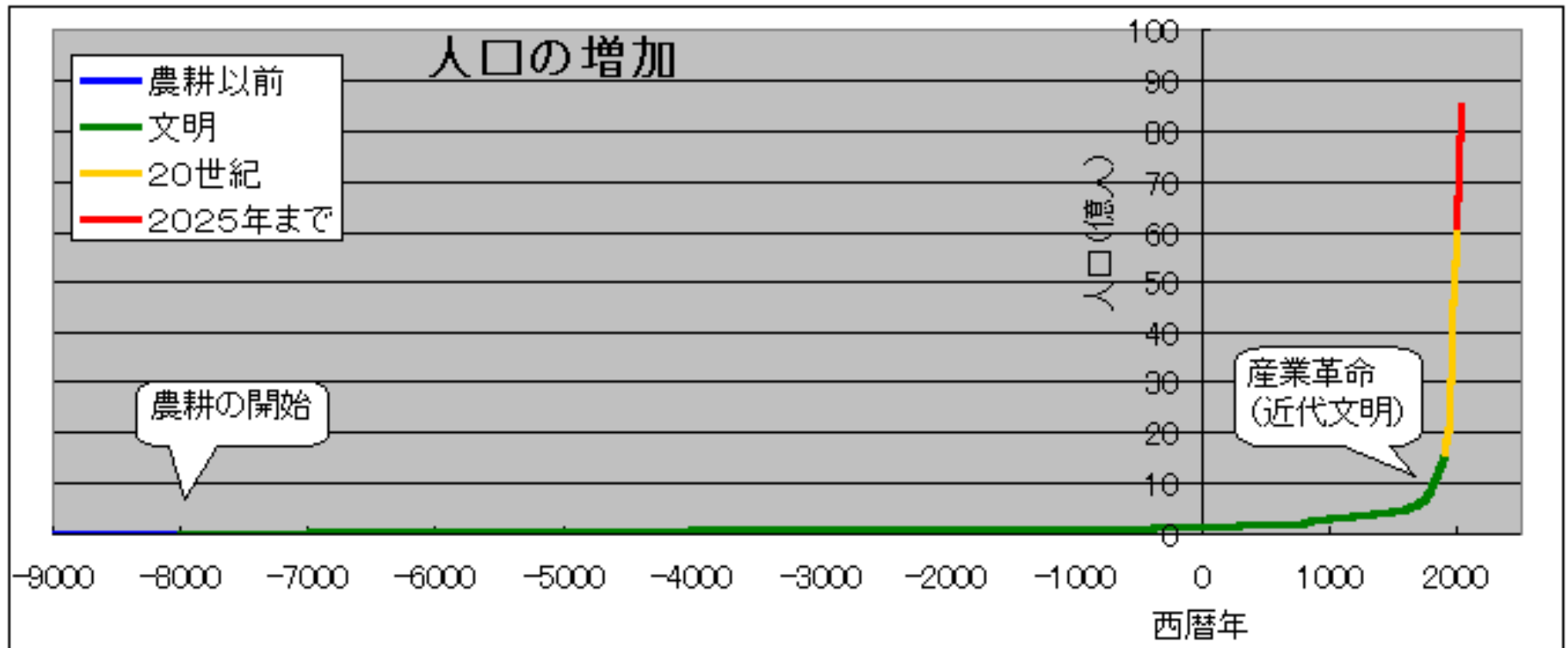


「核融合について学び・発信するフュージョンエネルギースクール事業」
(2025年度核融合科学研究所スクーリング・ネットワーキング事業・
Fusion Science School)

エネルギー問題と フュージョンエネルギー

九州大学応用力学研究所
花田 和明

人口の増加（全ての社会問題の原因）



我が国のエネルギー政策の基本方針

S+3Eの大原則

安全性 Safety

安全性の確保が大前提



安定供給

Energy Security

2040年度にエネルギー自給率3～4割程度
を見込む(2022年度12.6%)

経済効率性

Economic Efficiency

国際的に遜色ない価格

環境適合

Environment

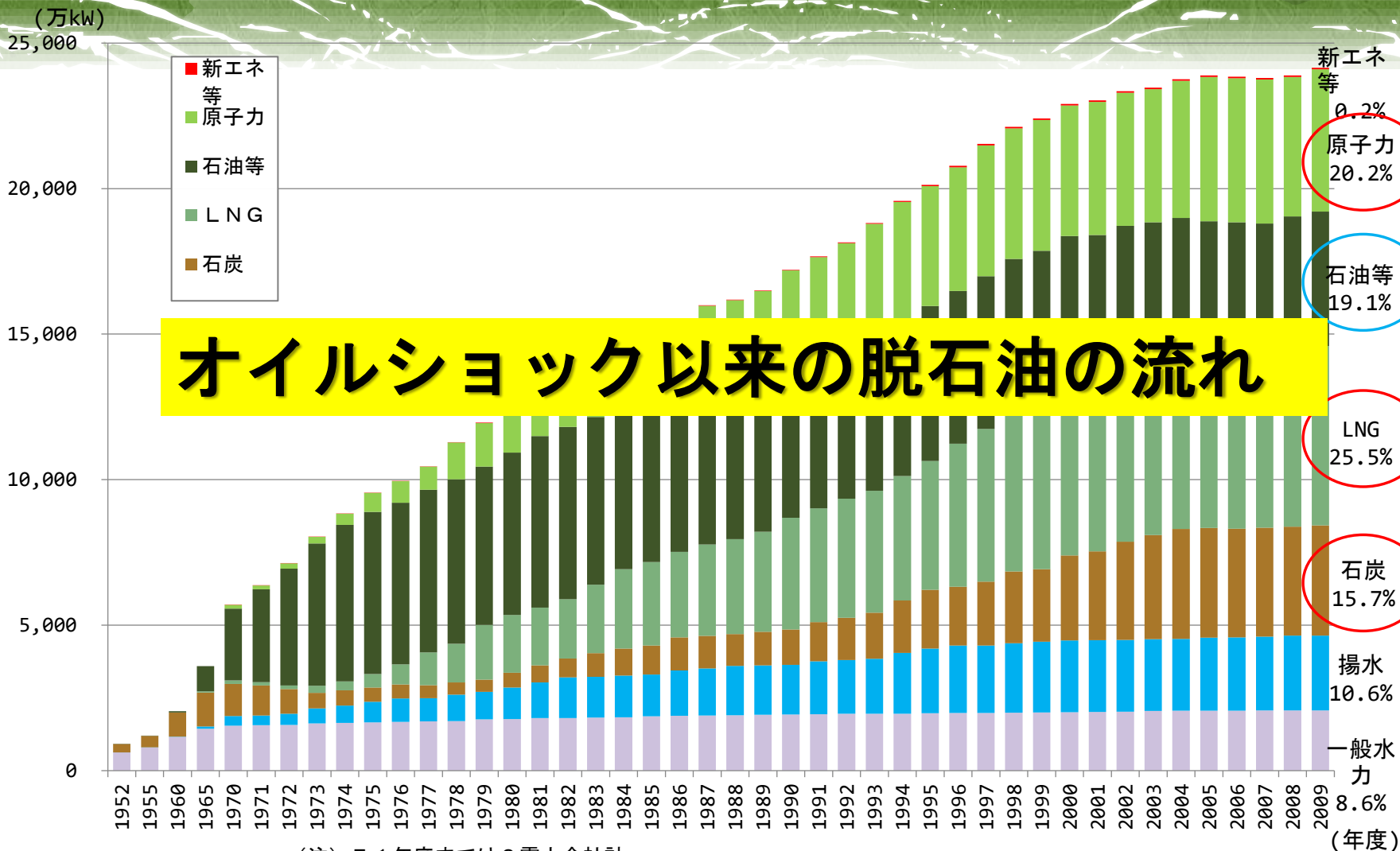
世界全体での1.5°C目標と統合的で、野心的
な削減目標(2013年度比)である2035年度
▲60%、2040年度▲73%を目指す

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2024/01.html>

ベストミックスの考え方を変えた 出来事とその対応

- オイルショック （脱オイル路線）
石炭火力＋天然ガス火力＋原子力
- 地球温暖化 （脱炭素）
原子力＋再生可能エネルギー
- 福島原発事故 （脱原発）
再生可能エネルギー＋省エネ＋火力
- 半導体工場、AI （安定した電力）
再生可能エネルギー＋新電源

我が国の電力ミックスの推移



(注) 71年度までは9電力会社計。

(出所) 資源エネルギー庁「電源開発の概要」、「電力供給計画の概要」をもとに作成

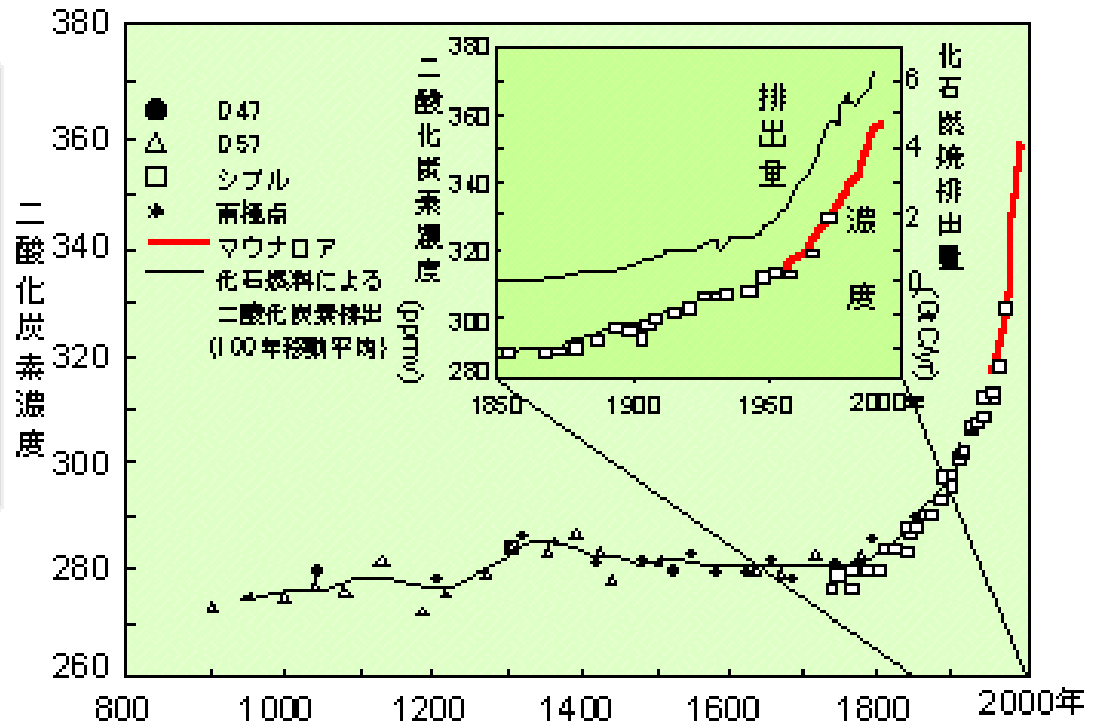
地球温暖化



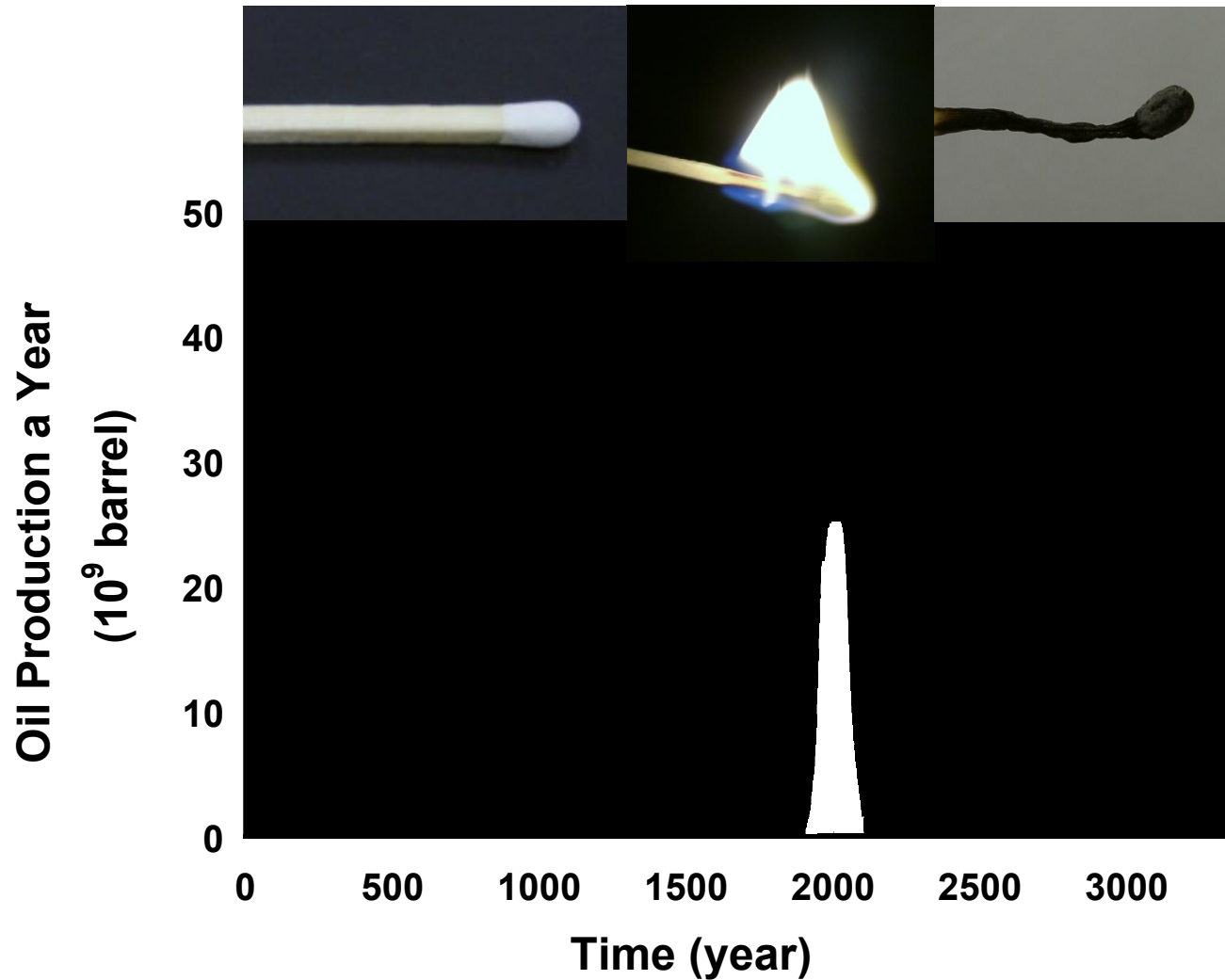
<http://www.wnn.or.jp/wnn-eco/cop3/>

大気中CO₂濃度の年代変化

単位：ppmv

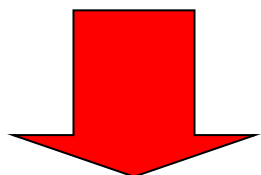


人類はマッチに火を付けた。



原始地球への回帰

原始地球（現在の金星や火星と同じ）
大気の成分の大半がCO₂、O₂は無

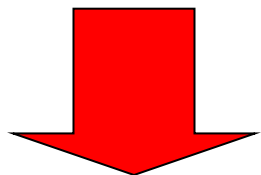


光合成（空中の炭素固定）



現在の地球

大気のCO₂は0.03%、O₂は21%



化石燃料使用による炭素の空中放出

原始地球



ストロマトライト

1-1. 2011年東北地方太平洋沖地震

福島第一原子力発電所



福島第二原子力発電所



- 2011年3月11日 14:46 に発生
- マグニチュード: 9.0 Mw
- 震源の場所: 北緯38.6度東経142.51度 深さ 24km
- 福島の原子力発電所を襲った津波の高さは14 m以上と言われている。

3-1. 福島第一原子力発電所の鳥瞰図



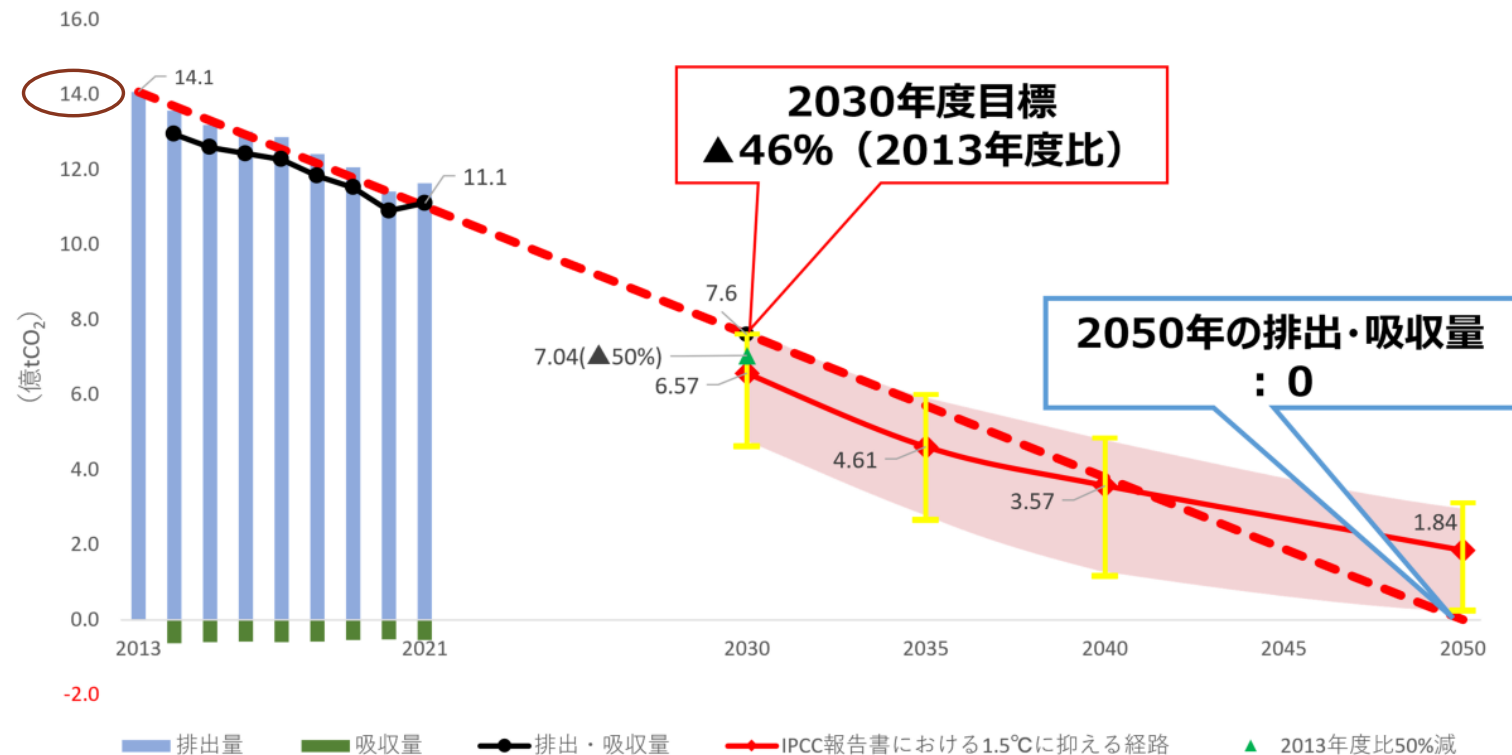
福島原発事故以降の脱原発の流れ



海に面した多くの
構造物が破壊され
ている

日本のカーボンニュートラルの見通し

【第131-2-1】日本における温室効果ガスの削減状況



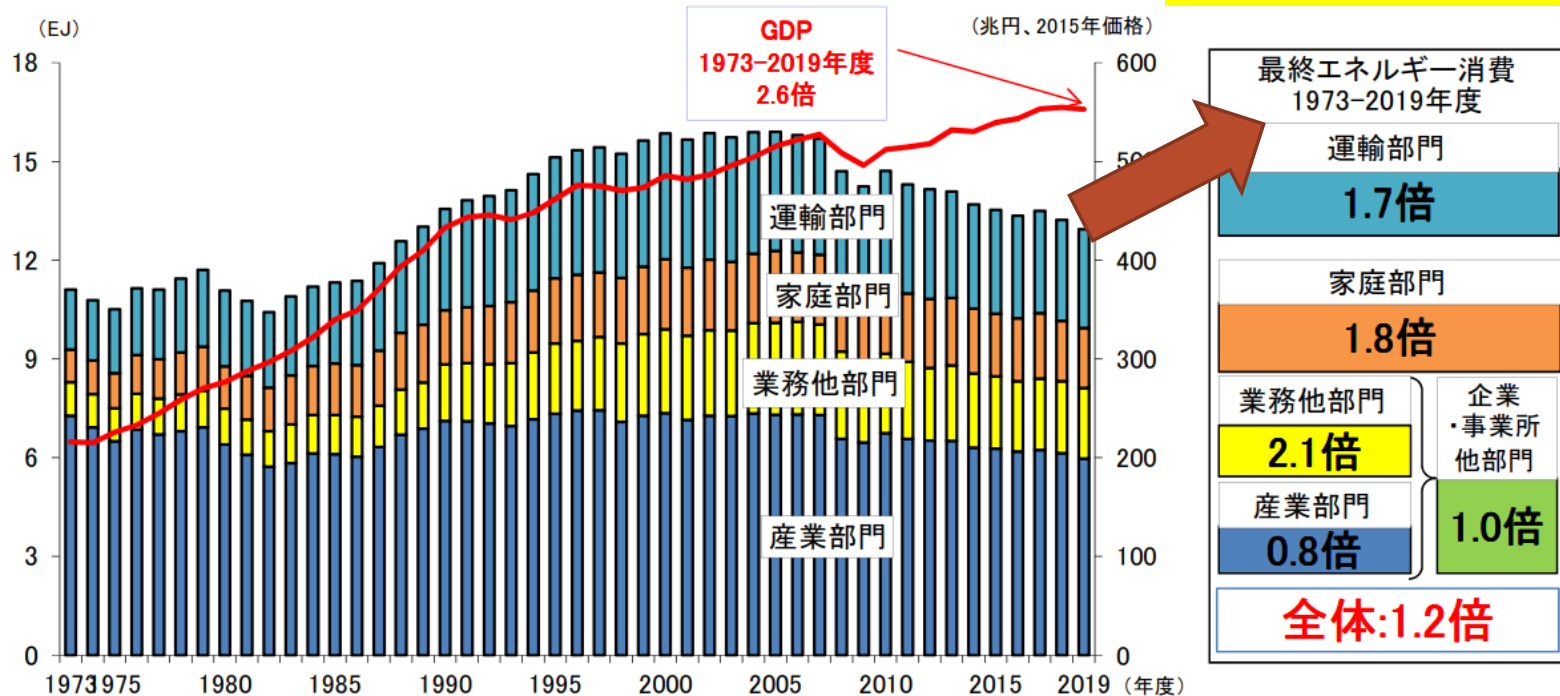
(注) 図中の赤い帯の範囲は、2023年3月に公表されたIPCC (気候変動に関する政府間パネル) 第6次評価報告書統合報告書において示された「1.5°Cに抑える経路における世界全体の温室効果ガス排出削減量」を、仮想的に割り当てたもの。この報告書では、モデルの不確実性等を加味し、1.5°Cに抑える経路については幅を持って示されているため、2030年・2035年・2040年・2050年時点における排出量についても、黄色線で幅を持って示している。また、その代表値をつないだものを赤色の実線で示している (以下各国における同種データについて同じ)。

資料：環境省作成

省エネルギーはさらに進んでいる GDPは増加しているが電力は減少

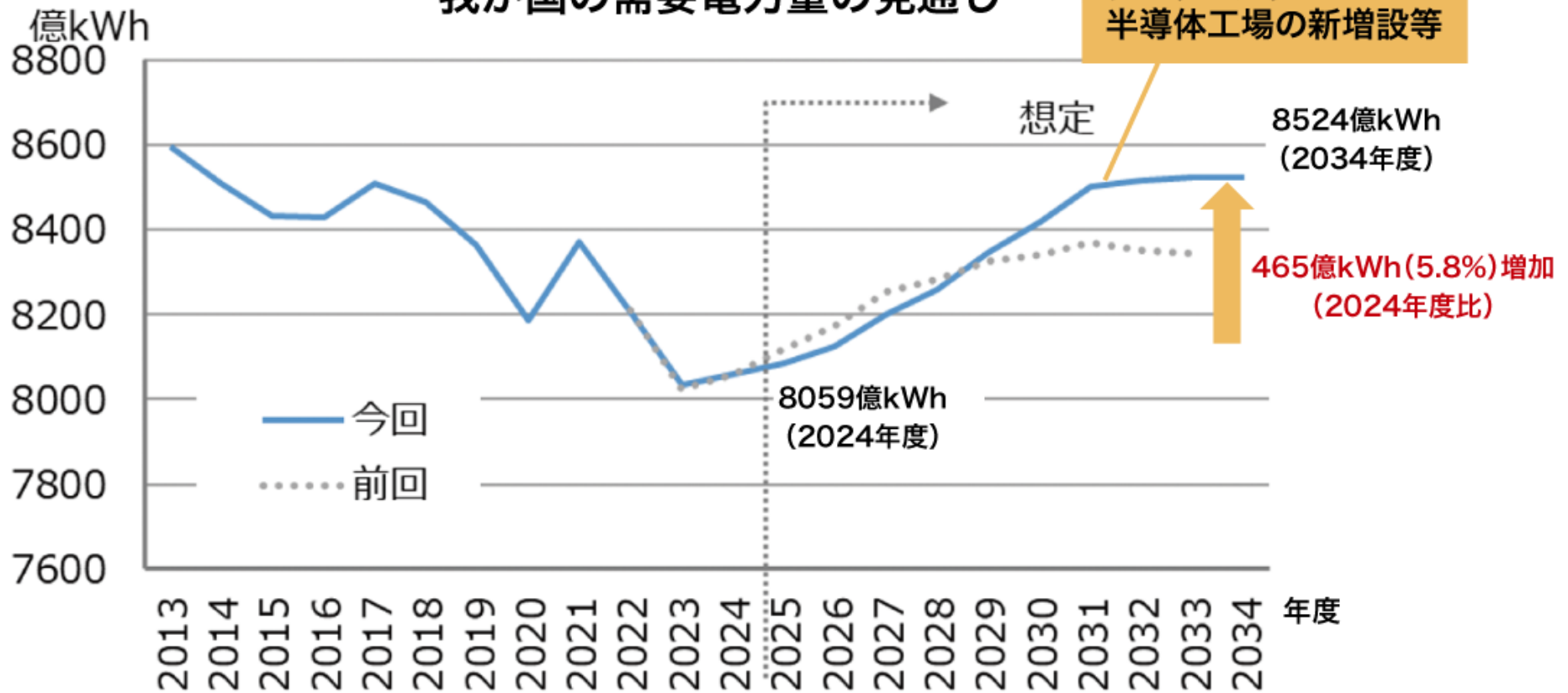
【第211-1-1】最終エネルギー消費と実質GDPの推移

IoT、AI？



将来の電力需要

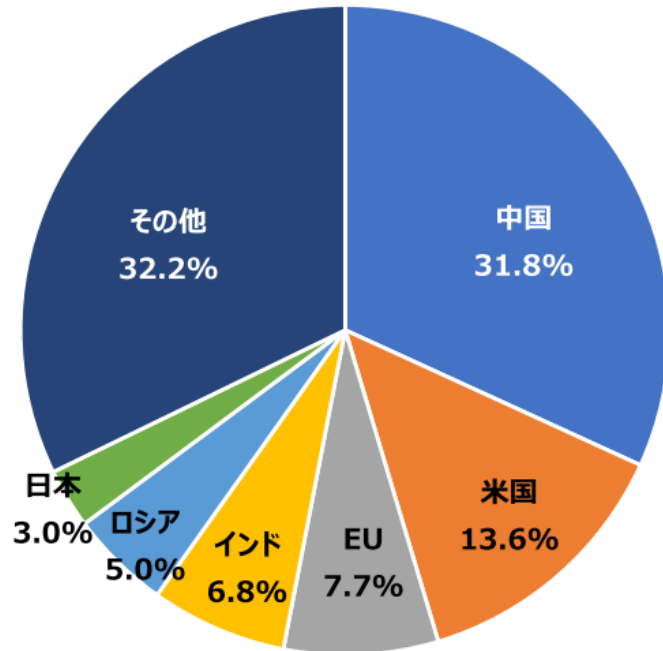
我が国の需要電力量の見通し



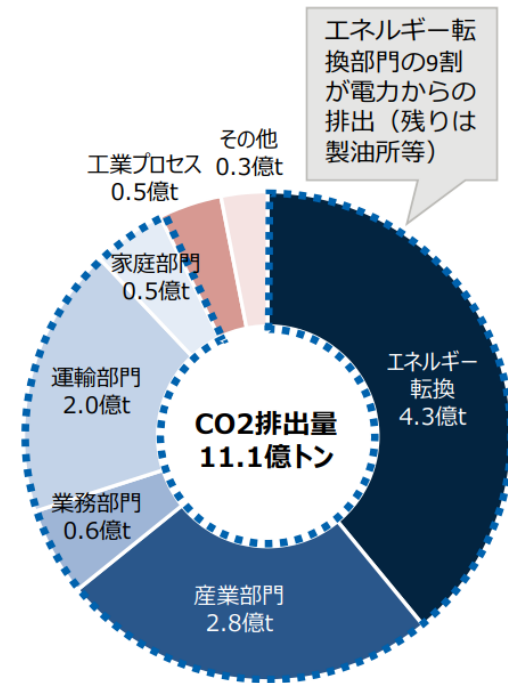
温室効果ガスの排出の現状

【第123-1-2】日本の部門別のCO₂排出量(2019年度)

【第131-1-4】2021年のエネルギー起源CO₂排出量(国別)



資料：IEA「CO₂ Emissions from Fuel Combustion」を基に経済産業省作成



出典：国立環境研究所「温室効果ガスインベントリオフィス」より経済産業省作成

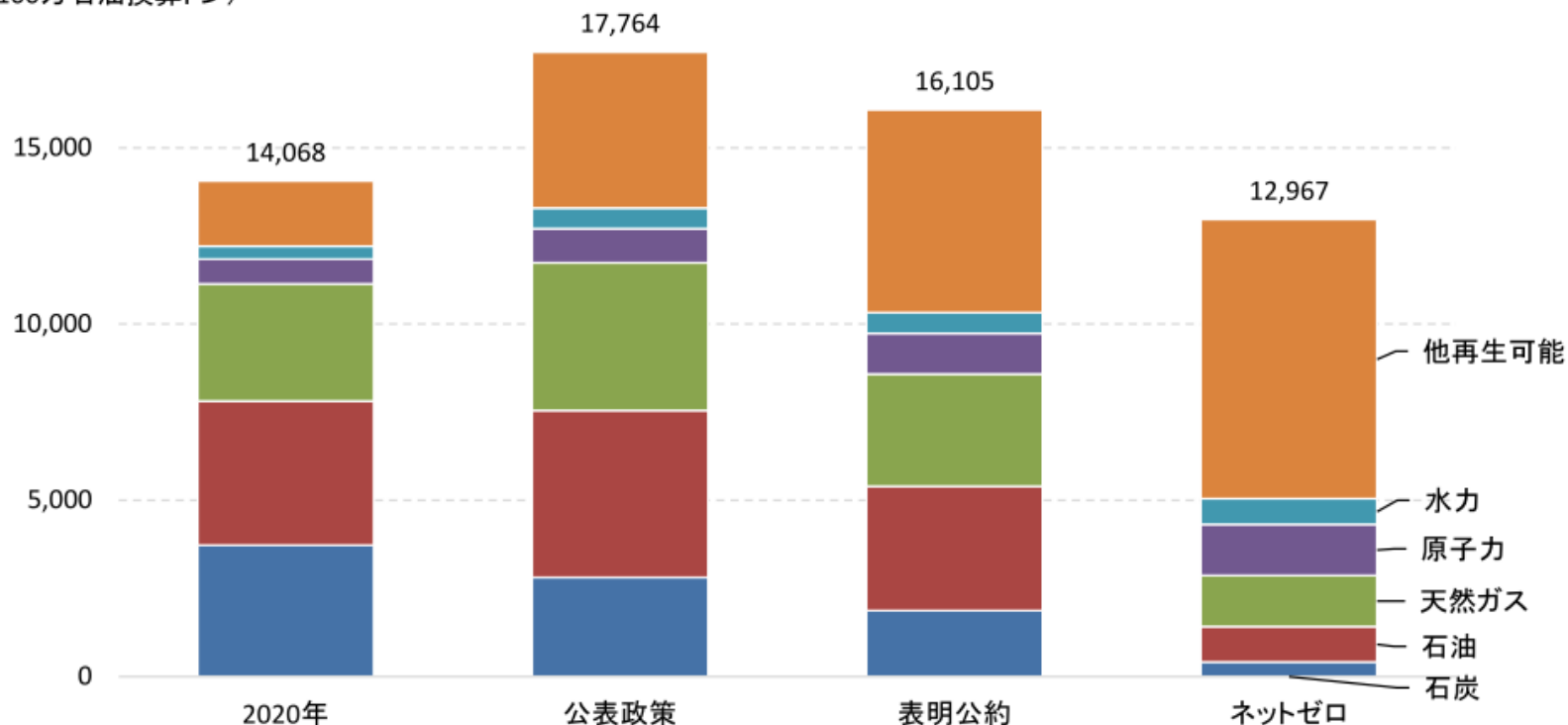
出展：エネルギー白書2024

出展：エネルギー白書2021

世界のエネルギー供給展望

【第221-1-5】世界のエネルギー供給展望(エネルギー源別、一次エネルギー供給量)

(100万石油換算トン)

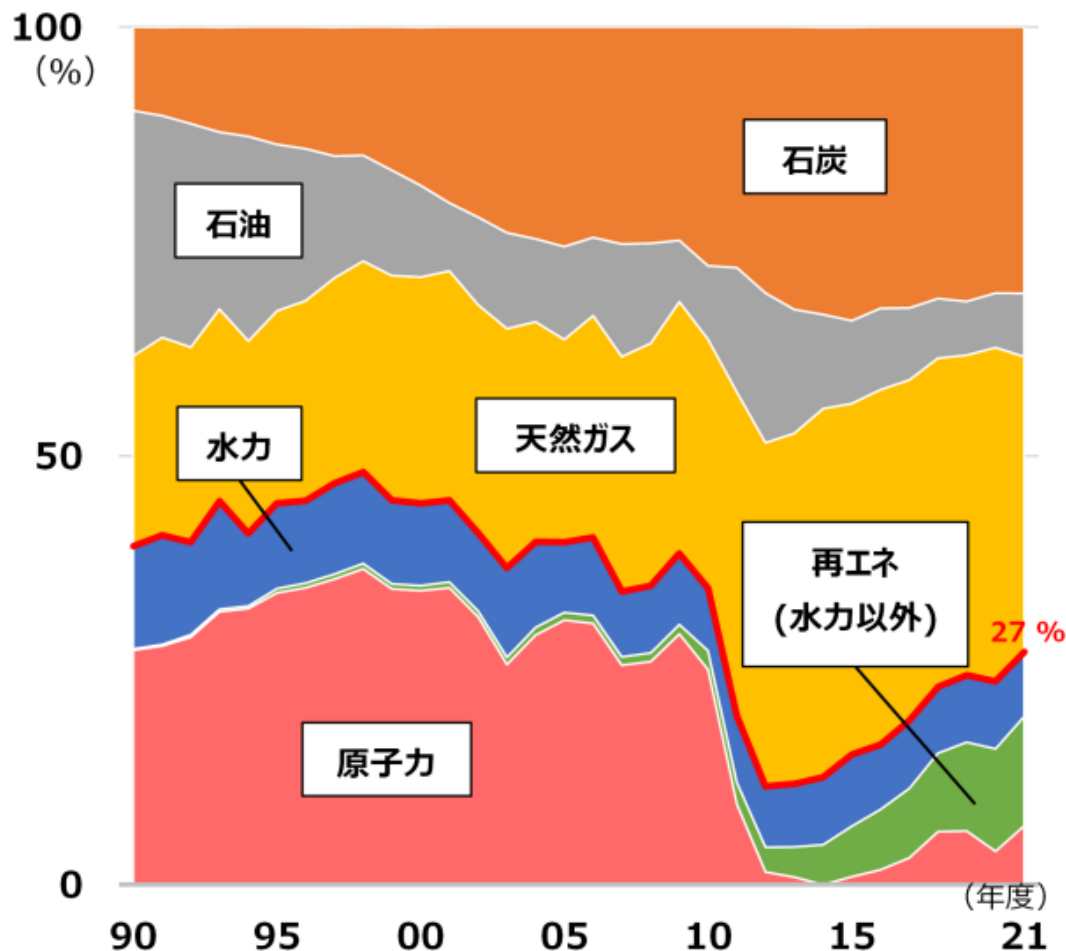


(注)他再生可能は、風力、太陽光、地熱、バイオマス等の再生可能エネルギーである。

資料：IEA「World Energy Outlook 2021」

我が国の電力ミックスの現状

【第131-2-2】日本における電源構成の推移



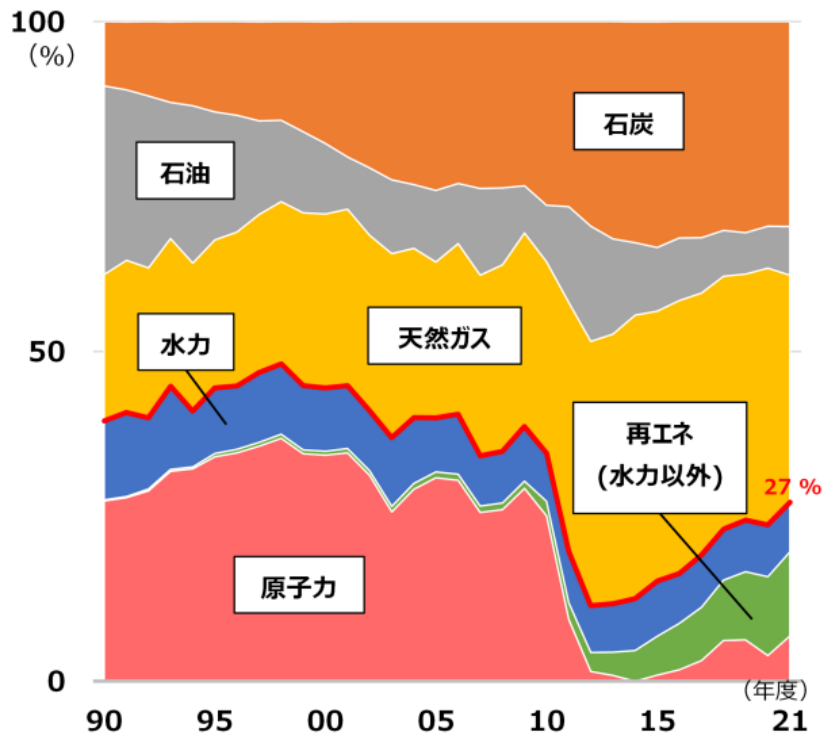
資料：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」を基に経済産業省作成

電源構成比較

英国

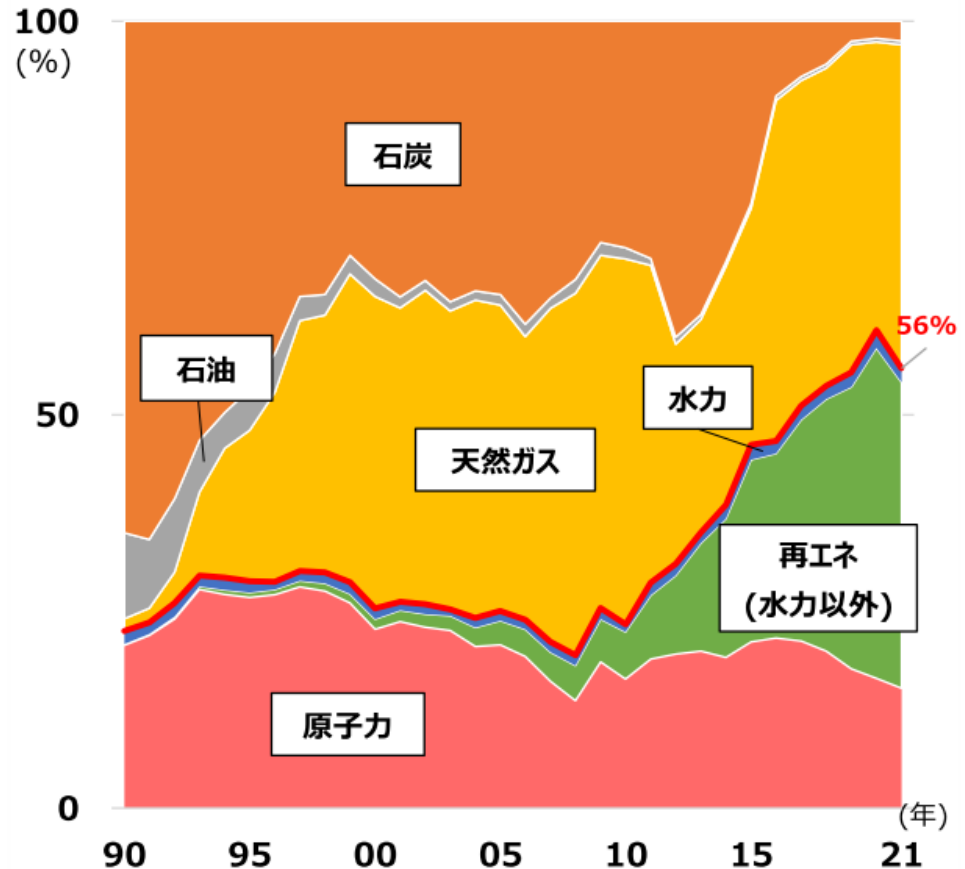
日本

【第131-2-2】日本における電源構成の推移



資料：資源エネルギー庁「総合エネルギー統計」を基に経済産業省作成

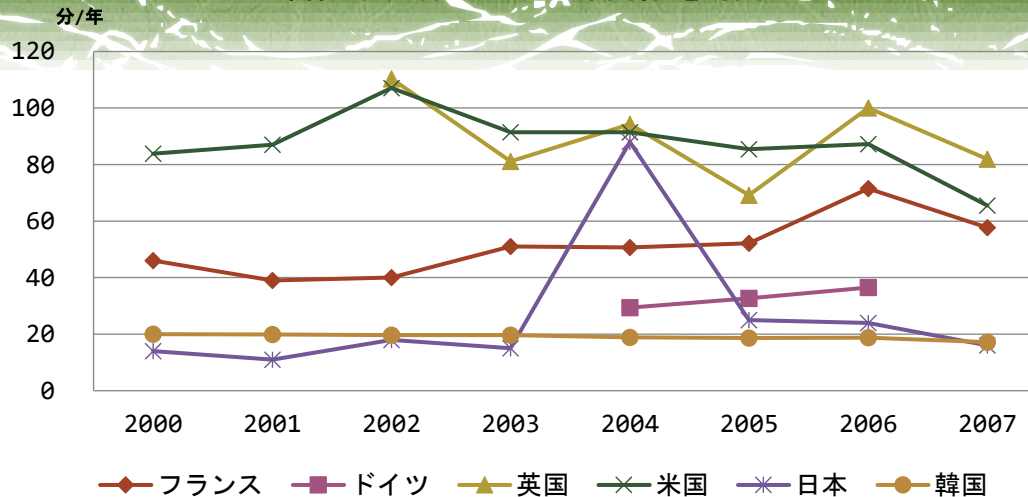
【第131-2-10】英国における電源構成の推移



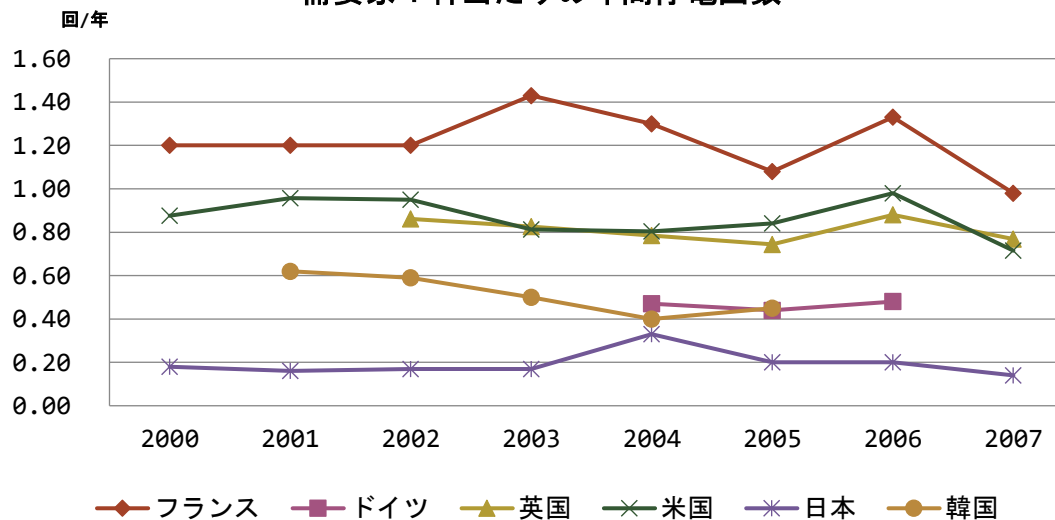
資料：IEA「World Energy Balances 2023」を基に経済産業省作成

我が国の電力安定性は高い

需要家1軒当たりの年間停電時間



需要家1軒当たりの年間停電回数



電力の安定供給に？

【第131-3-2】2020年度冬期の需給ひっ迫・市場高騰を巡る時系列整理

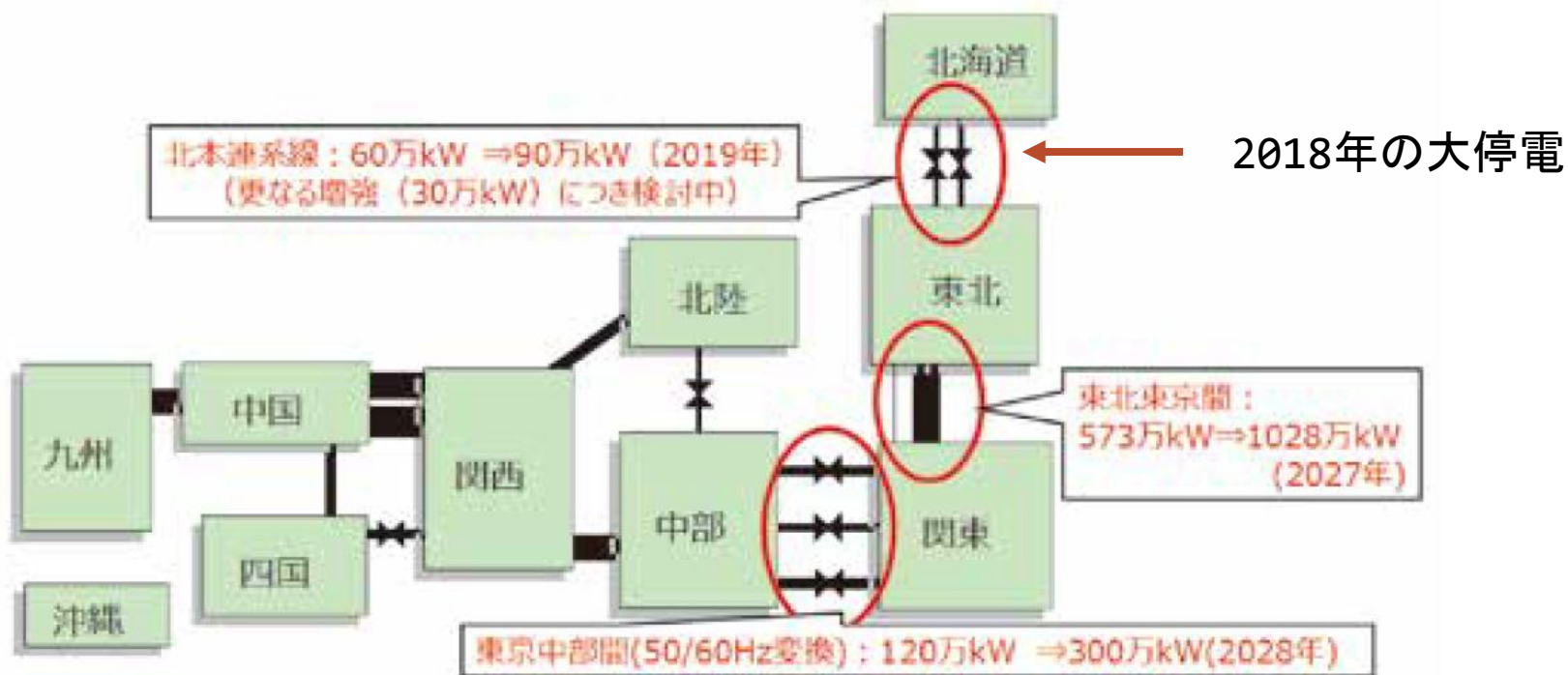
	①12月中旬	②12月下旬～1月初旬	③1月上旬	④1月中旬
概要	需給が厳しく、LNG消費進む 市場価格は落ち着いて推移	需要低下も、厳しい需給状況 燃料制約で売り切れ常態化	需給が最も厳しい時期 価格高騰	需給緩むものの、市場 売り切れ・価格高騰継続
需要	需要増 ※過去4年平均：4%増 (12/11～12/25)	需要例年並み ※過去4年平均：2%増 (12/26～1/5)	需要増加日が継続 ※全国にわたって厳しい日あり (1/8,12) ※過去4年平均：11%増 (1/6～1/12)	需要落ち着く ※過去4年平均：1%減 (1/13～1/25)
供給力	LNG消費進む 川内②稼働 (12/24)	燃料制約実施 石炭火カトラブル停止	燃料制約継続 石炭火カトラブル停止 ※日によっては太陽光出力低下発生	燃料在庫量増加傾向 大飯④稼働(1/17)
市場	価格は比較的 落ち着いて推移 市場平均価格：13.3円 (12/11～12/25) (2019年度：8.25円)	売り切れ状態常態化 市場平均価格：34.7円 (12/26～1/5) (2019年度：6.8円)	価格高騰 市場平均価格：102.7円 (1/6～1/12) (2019年度：7.9円)	売り切れ・価格高騰継続 市場平均価格：74.6円 (1/13～1/25) (2019年度：8.1円) ※日平均・コマ別最高価格発生、週明けから沈静化
エネ庁・広域 機関対応	関西への融通実施 (12/15,16)	関西(12/27,28) ・東京(1/3,4)への 融通実施	全国的に電力融通指示 ※計162回実施	効率的な使用呼びかけ インバランス料金上限設定

※10月実施の冬期需給検証では、厳気象にも対応できる予備率確保を確認(※kW評価)

出典：総合資源エネルギー調査会第34回電力・ガス基本政策小委員会資料より抜粋

電力融通の状況

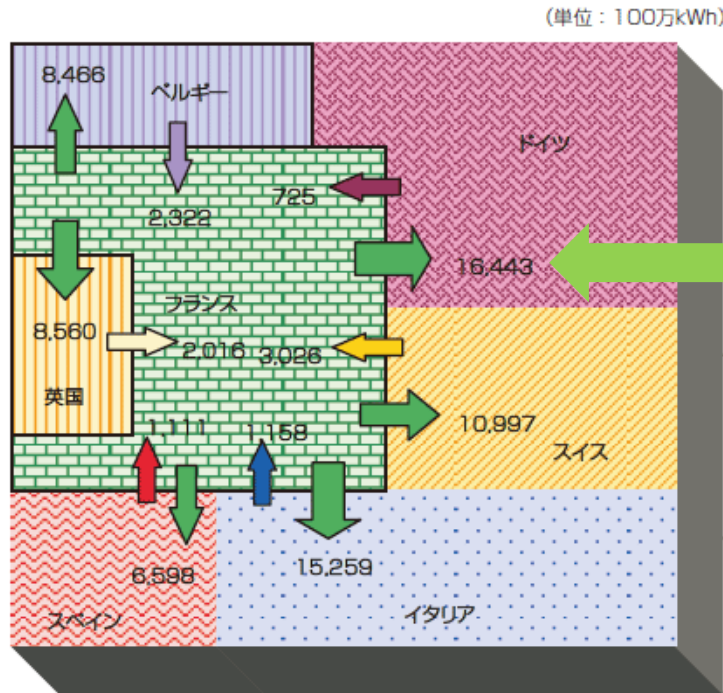
【第122-1-1】地域間連系線の増強計画



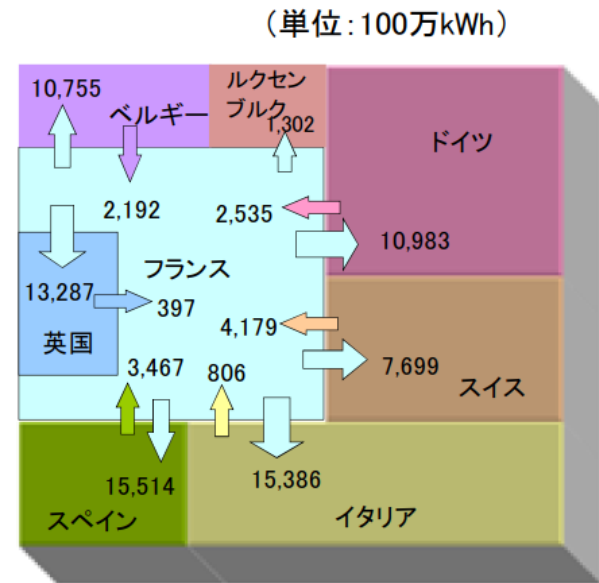
出典：経済産業省「電力システムのレジリエンス強化に向けた背景」より抜粋・加工

欧州内では電力の輸出入が活発に行われている（スペイン停電）

【第223-1-7】欧州の電力輸出入の状況（フランスの例2018年）



原発2基分に相当



出典: IEA「Electricity Information Overview (2020 edition)」を基に作成

(※)本図における輸出入の数字は、物理的な電力量の移動を示したものの。

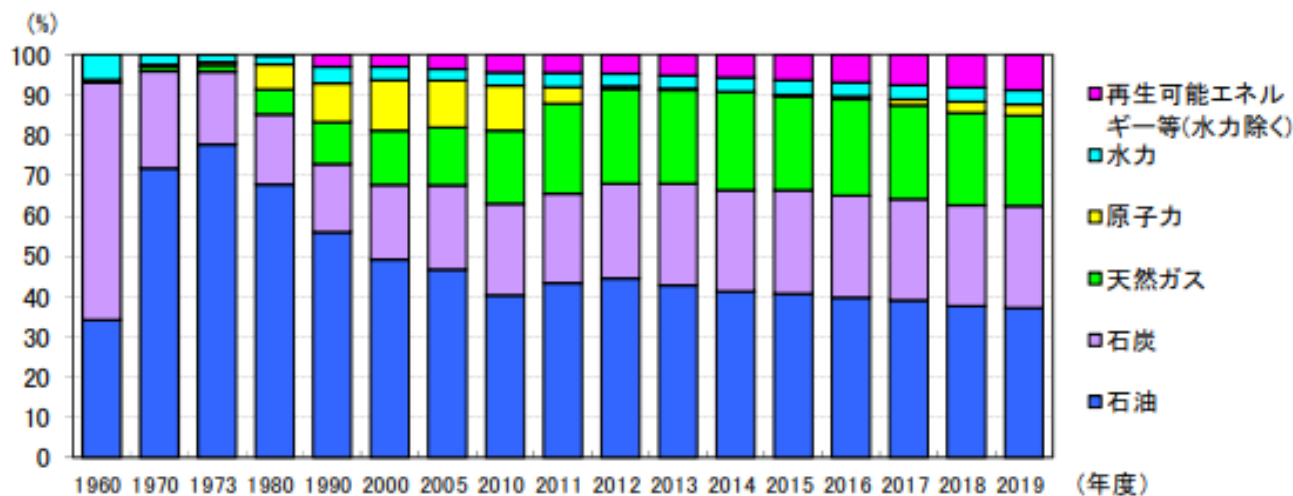
出展: エネルギー白書2010

欧州内の電力輸出入の状況
(2007年)

電力の輸出入はひとつの選択肢。ただし送電網の整備が不可欠

エネルギー自給率の低下 エネルギー安全保障上の問題

【第211-4-1】一次エネルギー国内供給構成及び自給率の推移



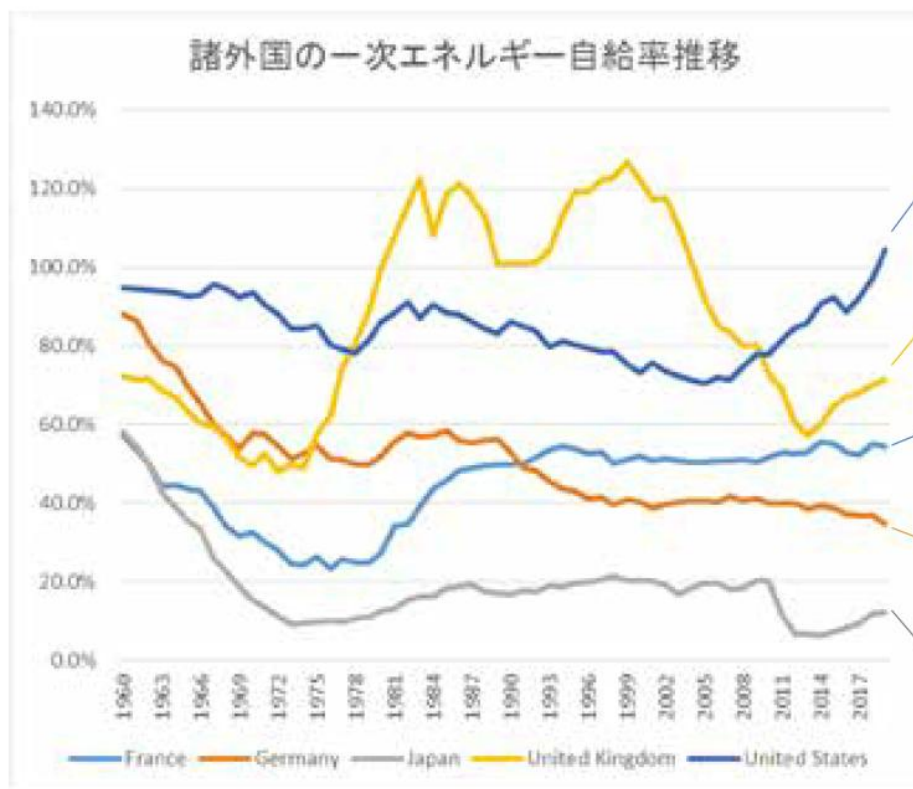
年度	1960	1970	1973	1980	1990	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
エネルギー自給率(%)	58.1	15.3	9.2	12.6	17.0	20.3	19.6	20.2	11.5	6.7	6.5	6.3	7.3	8.1	9.4	11.7	12.1

(注1) IEAは原子力を国産エネルギーとしている。(注2)エネルギー自給率(%) = 国内産出/一次エネルギー供給 × 100。
出典：1989年度以前はIEA「World Energy Balances 2020 Edition」、1990年度以降は経済産業省「総合エネルギー統計」を基に作成

エネルギー自給率の現状

【第131-1-1】各国の一次エネルギー自給率の推移

各国の特徴



【アメリカ】

- ✓ シェールガス、シェールオイル生産でほぼ全てのガス・石油需要を自給

【イギリス】

- ✓ 北海油田の石油や風力発電・原子力の拡大により高い自給率

【フランス】

- ✓ 電源構成に占める原子力発電の割合は高いものの、その他の資源は輸入に依存

【ドイツ】

- ✓ 高い再エネ普及、石炭の国内生産、原子力発電の利用から一定の自給率

【日本】

- ✓ 化石資源をほぼ全て海外に依存、再エネの利用は拡大も原子力発電の利用が進まず、極めて低い自給率

出典：総合資源エネルギー調査会第38回基本政策分科会資料より抜粋

出展：エネルギー白書2021

エネルギーの価格の推移

ノルドストリーム1停止

【第121-1-1】エネルギー市場価格の推移

コロナ後の
経済回復

ウクライナ侵攻

欧州暖冬
風力

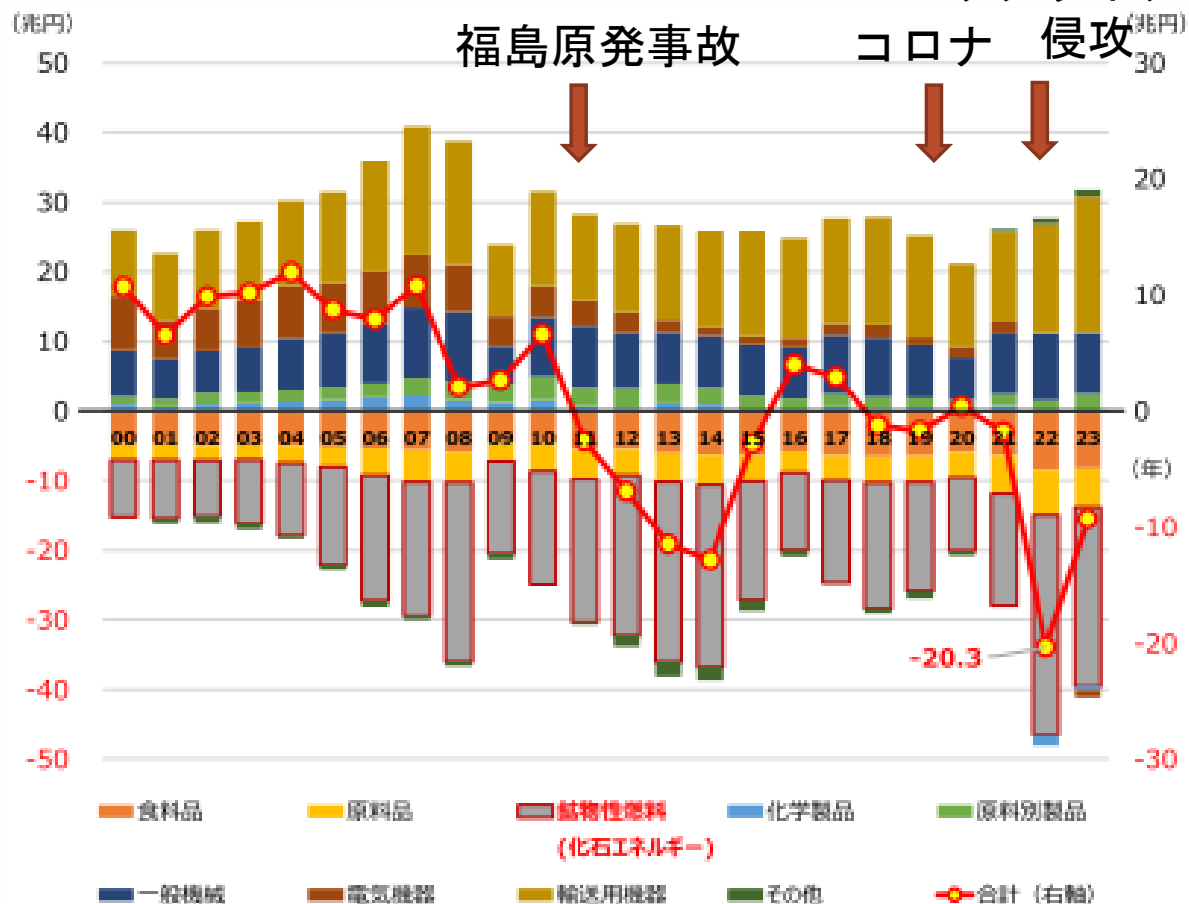


資料：S&P Global Platts等を基に経済産業省作成

出展：エネルギー白書2023

貿易収支（燃料費で逼迫）

【第122-1-4】日本の貿易収支の推移



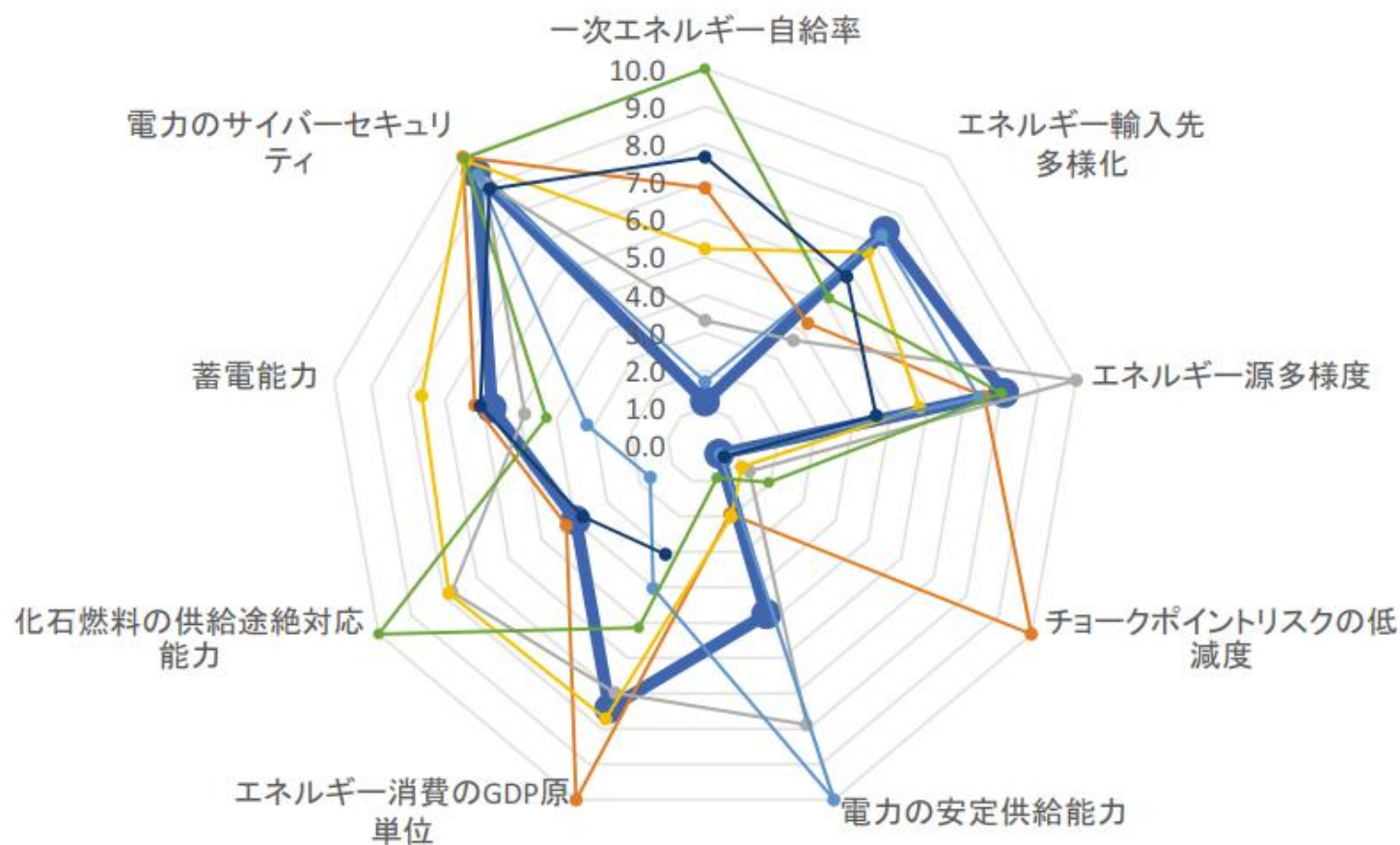
(注)「鉱物性燃料」は、「石炭及びコークス及び練炭」、「石油及び石油製品」、「天然ガス及び製造ガス」の合計値であり、化石エネルギーに相当する。

資料：財務省「貿易統計」を基に経済産業省作成

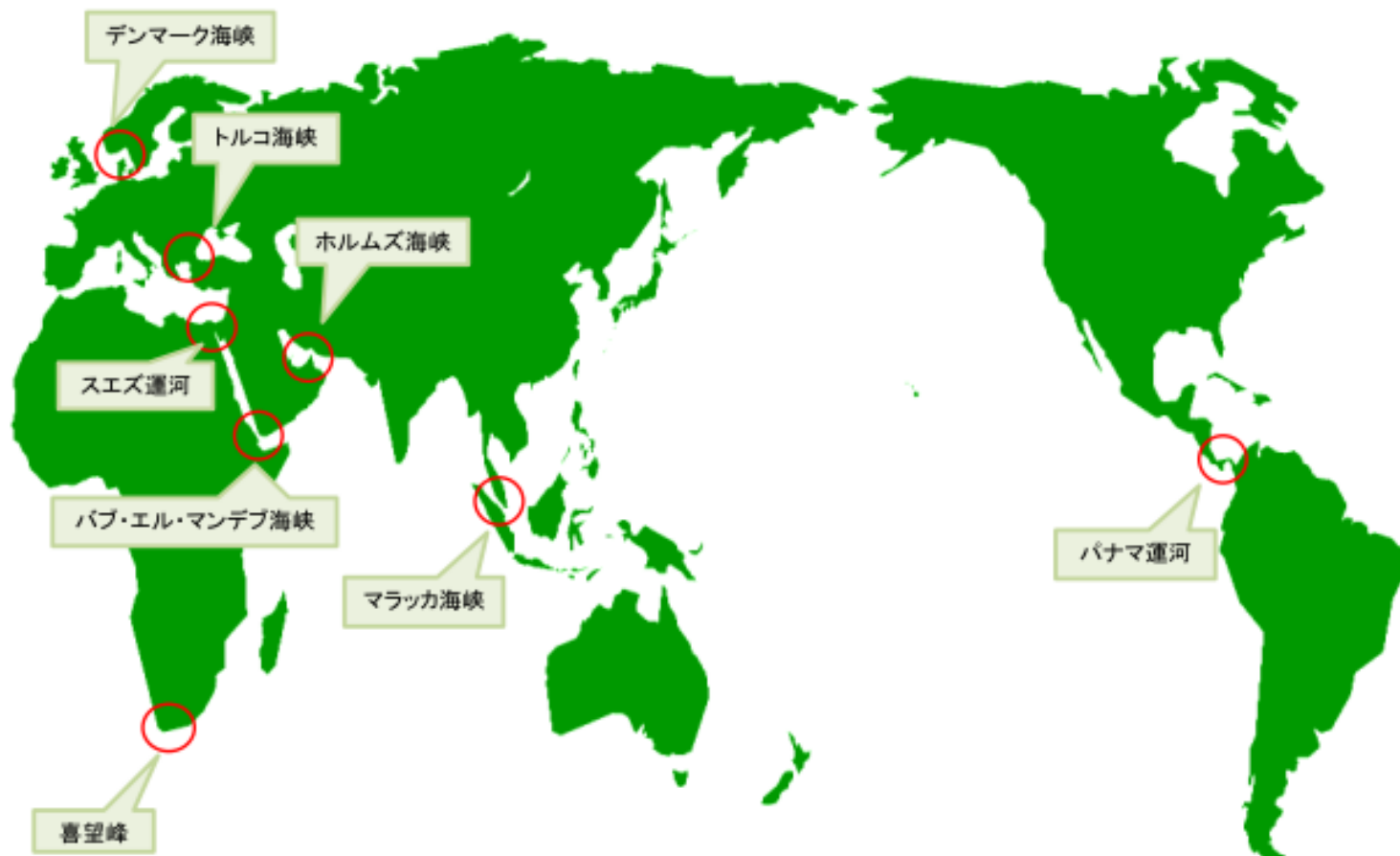
エネルギーセキュリティの総合評価

【第133-5-5】エネルギーセキュリティの変化を踏まえた定量評価(最新実績)

● 日 ● 英 ● 独 ● 仏 ● 韓 ● 米 ● 中



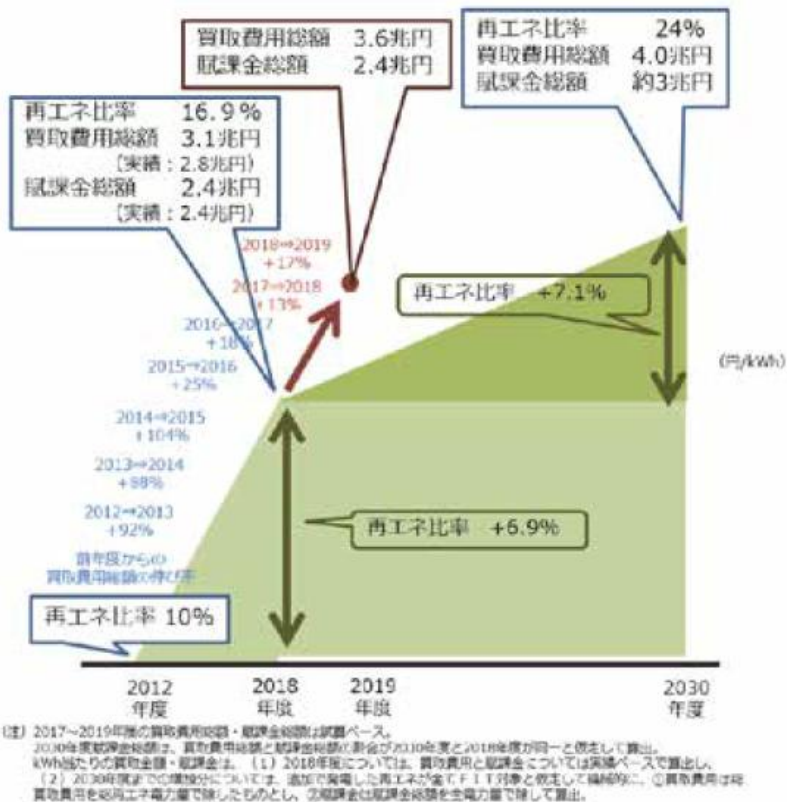
世界のチョークポイント



資料：IEA「Oil information 2023 database」、中国輸入統計を基に作成

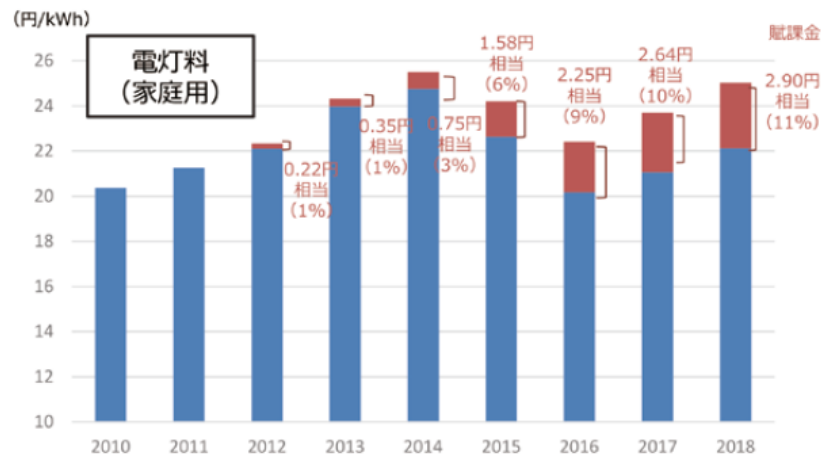
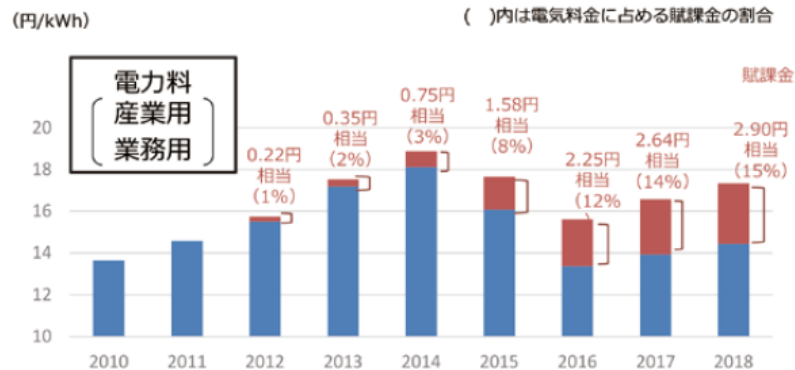
再エネ賦課金が国民の負担に

【第123-1-2】再エネ賦課金と国民負担の増大



出典：経済産業省「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた制度改革の必要性と課題」より

【第123-1-3】旧一般電気事業者の電気料金平均単価の推移

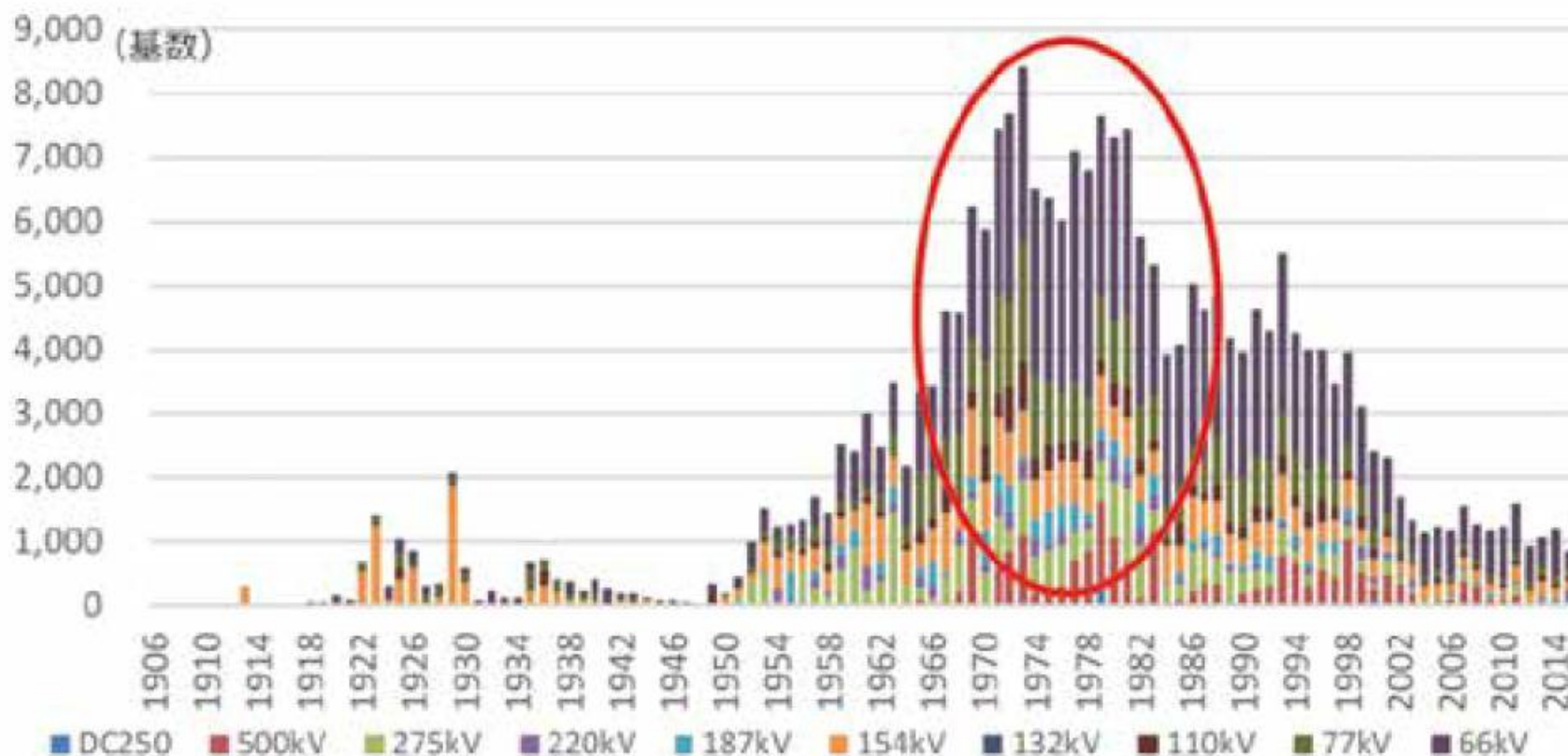


(注) 発電電月報、各電力会社決算資料等をもとに資源エネルギー庁作成。
 グラフのデータには消費税を含まないが、併記している賦課金相当額には消費税を含む。
 なお、電力平均単価のグラフではFIT賦課金減免分を機械的に試算・控除の上で賦課金額の幅を図示。

出典：経済産業省「再生可能エネルギーの主力電源化に向けた制度改革の必要性と課題」より抜粋・一部修正

老朽化対策

【第122-1-4】全国の送電鉄塔の建設年別の内訳



出典：経済産業省「電力システムのレジリエンス強化に向けた背景」より抜粋・加工

出展：エネルギー白書2020

エネルギー安定供給には莫大なコストが必要

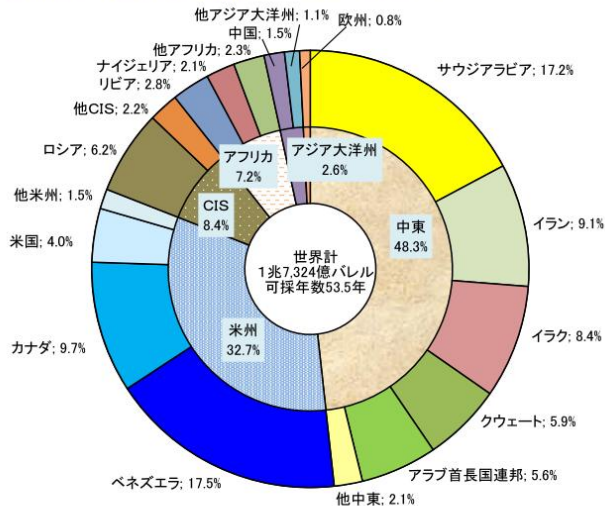
【第124-2-1】2050年のエネルギー安定供給を実現するために必要な累積投資額



化石燃料の偏在性

石油

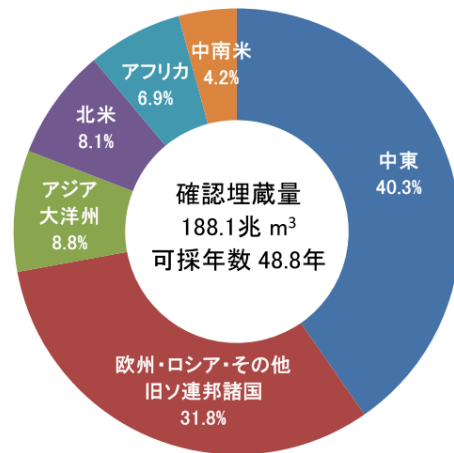
【第222-1-1】世界の石油確認埋蔵量(2020年末)



資料：Energy Institute「Statistical Review of World Energy 2023」を基に作成(埋蔵量データは2022年版から更新なし)

天然ガス

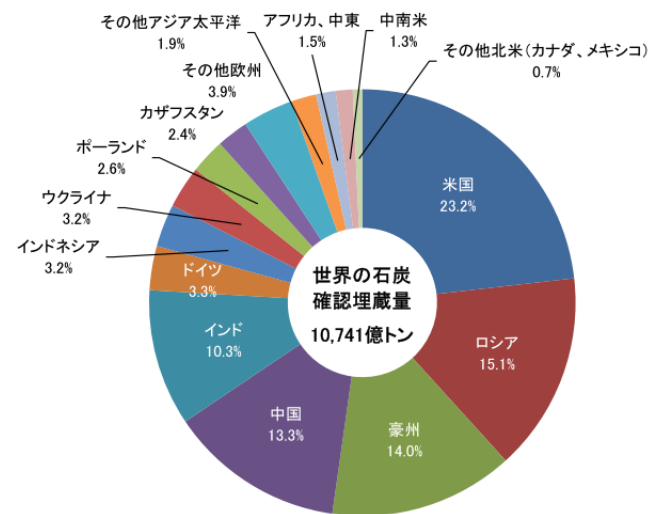
【第222-1-12】世界の天然ガス確認埋蔵量(2020年末)



資料：Energy Institute「Statistical Review of World Energy 2023」に作成(埋蔵量データは2022年版から更新なし)

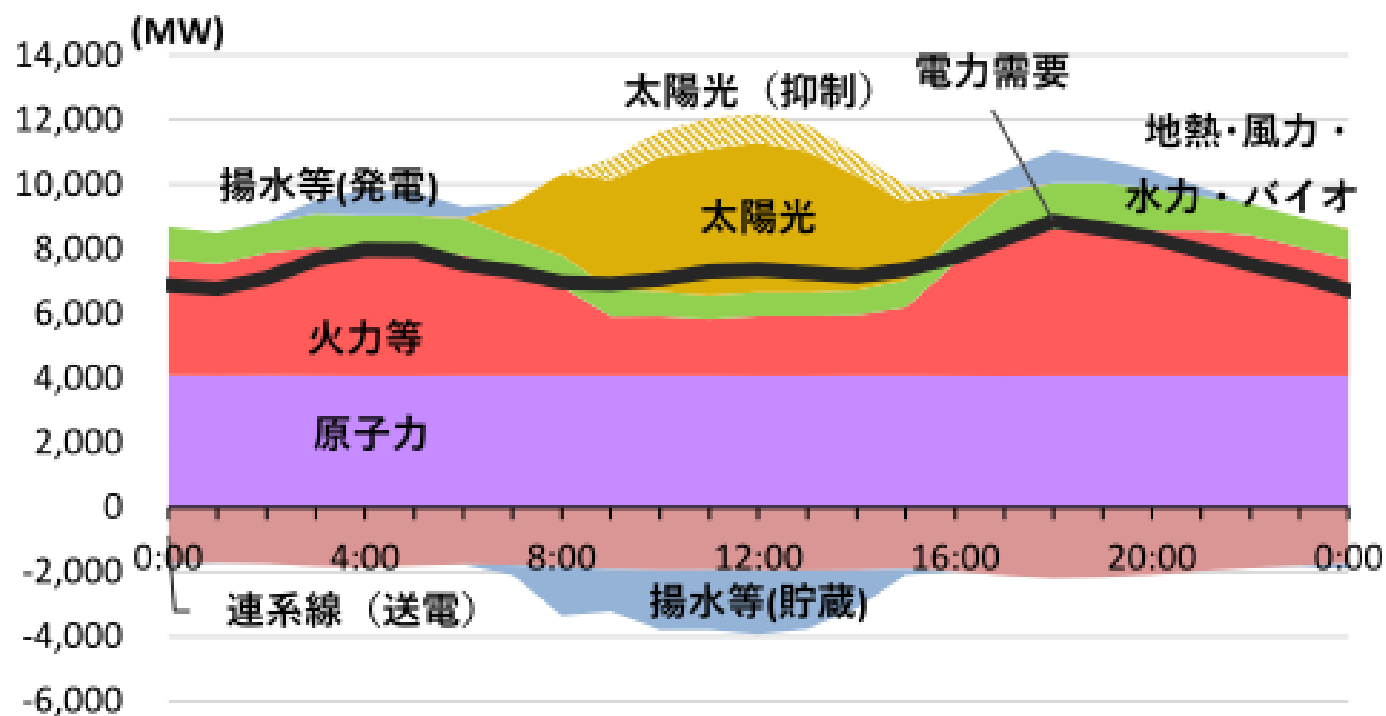
石炭

【第222-1-31】世界の石炭確認埋蔵量(2020年末)



電力の需給バランスは主に火力と陽水発電で とっている。

【第213-2-14】九州エリア需給実績と出力抑制の状況（2018年10月21日）



(注) 太陽光発電の自家消費分は、「太陽光」には含まれず、「電力需要」の減少分として表れている。

資料：九州電力Webサイトを基に作成

カーボンニュートラルへの道

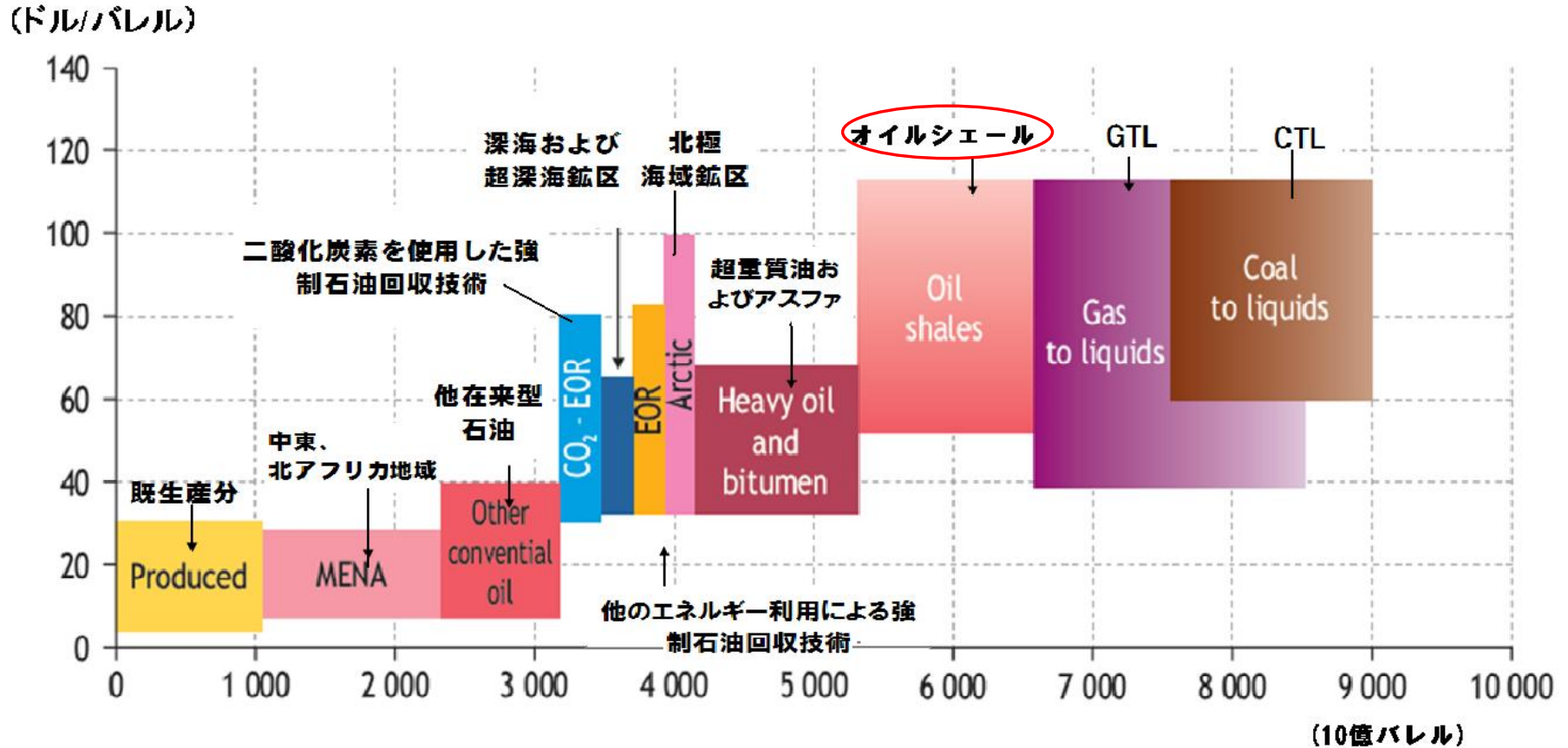
【第121-1-1】年限付きのカーボンニュートラルを表明した国・地域



資料：経済産業省作成

埋蔵量別石油生産コスト イノベーションでエネルギー事情は変化

図 埋蔵量別の石油生産コストの推計



出所 IEA, "World Energy Outlook 2008"

世界では石炭火力で電力アクセスを果たした人口が最も多い

【第131-1-5】電力アクセスの現状

エネルギーアクセスは、国連SDGsのゴール7に位置づけられる



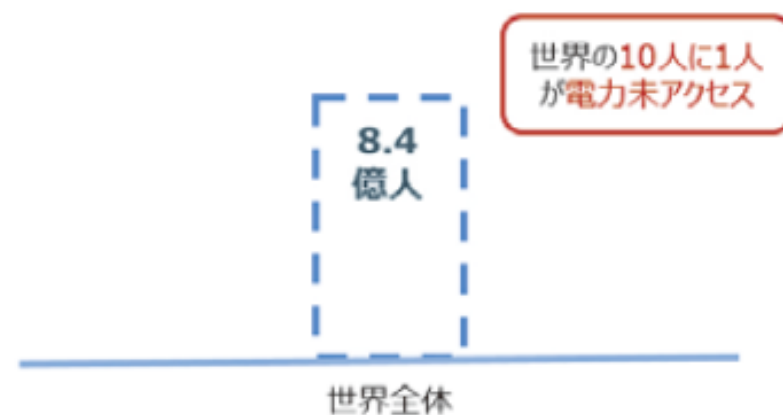
すべての人に手ごろで信頼でき、持続可能かつ近代的なエネルギーへのアクセスを確保する

2000年～2015年で
新たに電力アクセスを得た人数



出所：国際エネルギー機関(IEA)「Energy Access Outlook2017」

いまだ電力アクセスが無い人数

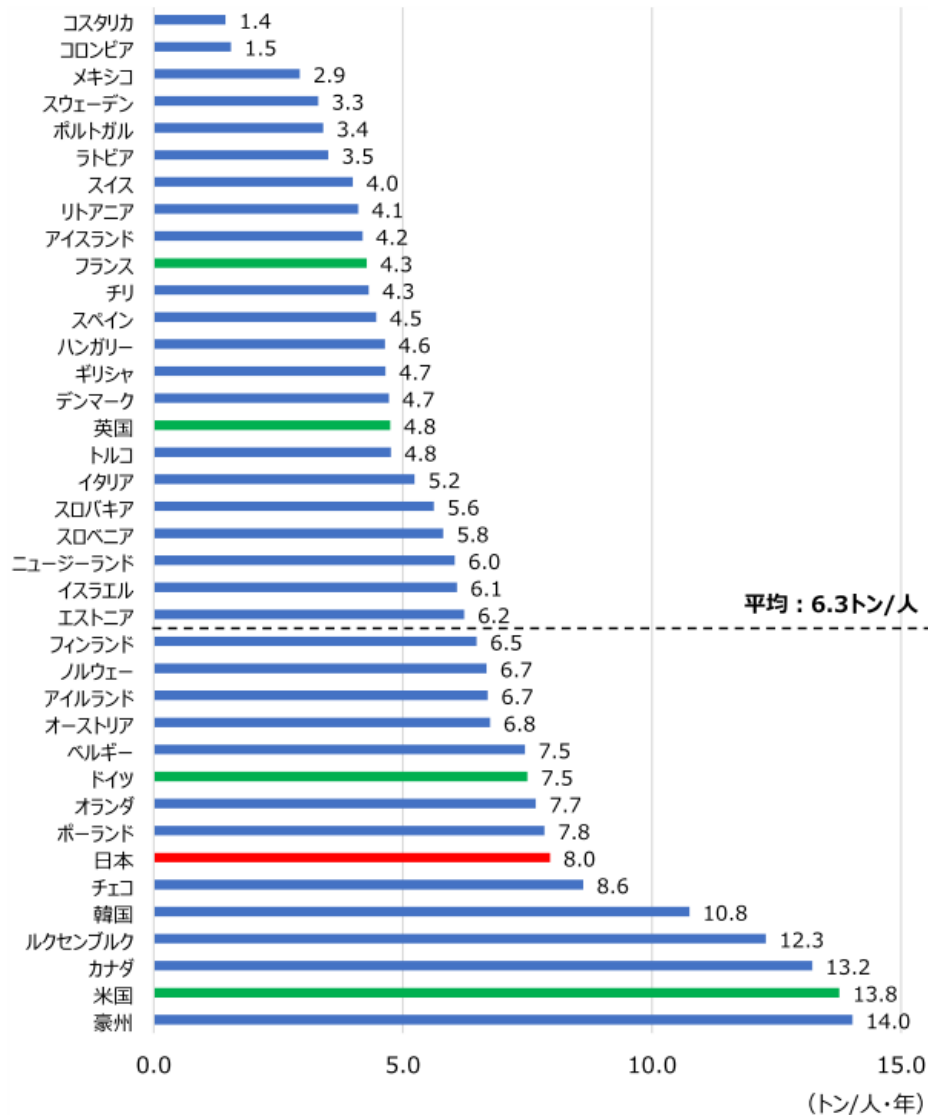


出所：国連「SDGs Report 2019」(2017年)

出典：IEA「Energy Access Outlook2017」及び国連「The Sustainable Development Goals Report 2019」より経済産業省作成

エネルギー 起因のCO₂ 排出量

【第131-3-1】OECD加盟国(38か国)における1人当たりのエネルギー起源CO₂排出量(2021年)



資料：IEA「World Energy Balances 2023」、「CO₂ Emissions from Fuel Combustion」を基に経済産業省作成

電力構成

【参考】2040年度におけるエネルギー需給の見通し

- 2040年度エネルギー需給の見通しは、諸外国における分析手法も参考としながら、**様々な不確実性が存在することを念頭に、複数のシナリオを用いた一定の幅**として提示。

		2023年度 (速報値)	2040年度 (見通し)
エネルギー自給率		15.2%	3～4割程度
発電電力量		9854億kWh	1.1～1.2兆 kWh程度
電源構成	再エネ	22.9%	4～5割程度
	太陽光	9.8%	23～29%程度
	風力	1.1%	4～8%程度
	水力	7.6%	8～10%程度
	地熱	0.3%	1～2%程度
	バイオマス	4.1%	5～6%程度
	原子力	8.5%	2割程度
火力		68.6%	3～4割程度
最終エネルギー消費量		3.0億kL	2.6～2.7億kL程度
温室効果ガス削減割合 (2013年度比)		22.9% ※2022年度実績	73%

(参考) 新たなエネルギー需給見通しでは、2040年度73%削減実現に至る場合に加え、実現に至らないシナリオ(61%削減)も参考値として提示。73%削減に至る場合の2040年度における天然ガスの一次エネルギー供給量は5300～6100万トン程度だが、61%削減シナリオでは7400万トン程度の見通し。 9

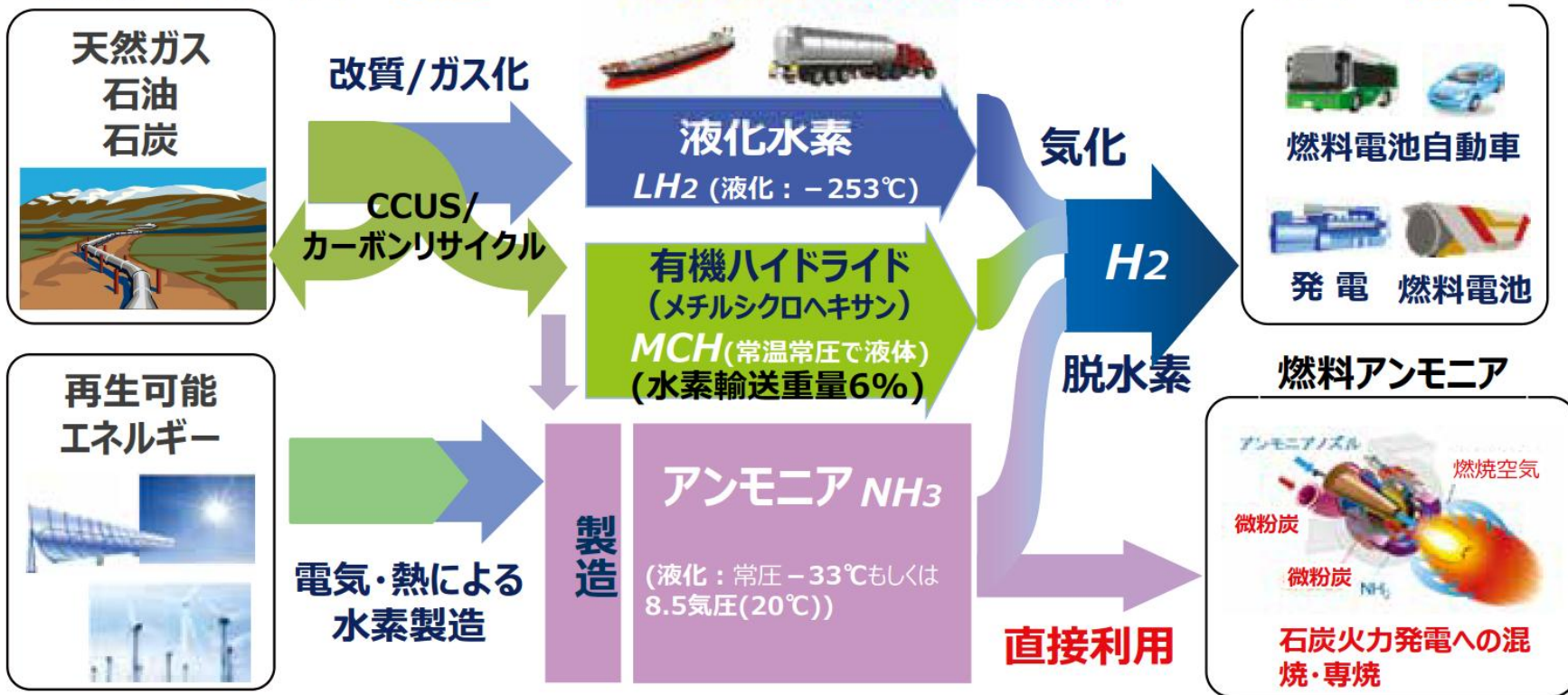
次世代燃料セキュリティ

【第132-4-2】次世代燃料のセキュリティ

資源豊富な海外：製造

海上輸送 (液体：水素キャリア)

日本：利用

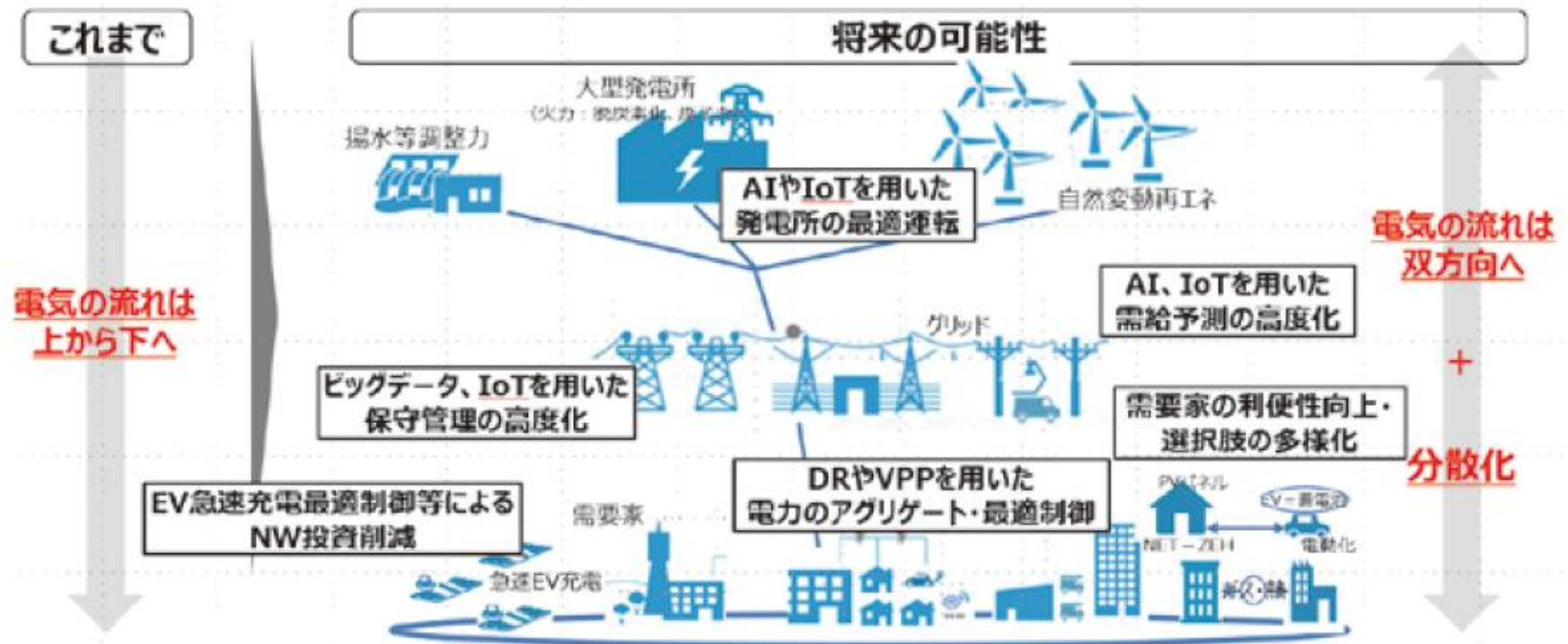


出典：総合資源エネルギー調査会第35回基本政策分科会資料より抜粋

出展：エネルギー白書2021

分散型電源の普及の促進

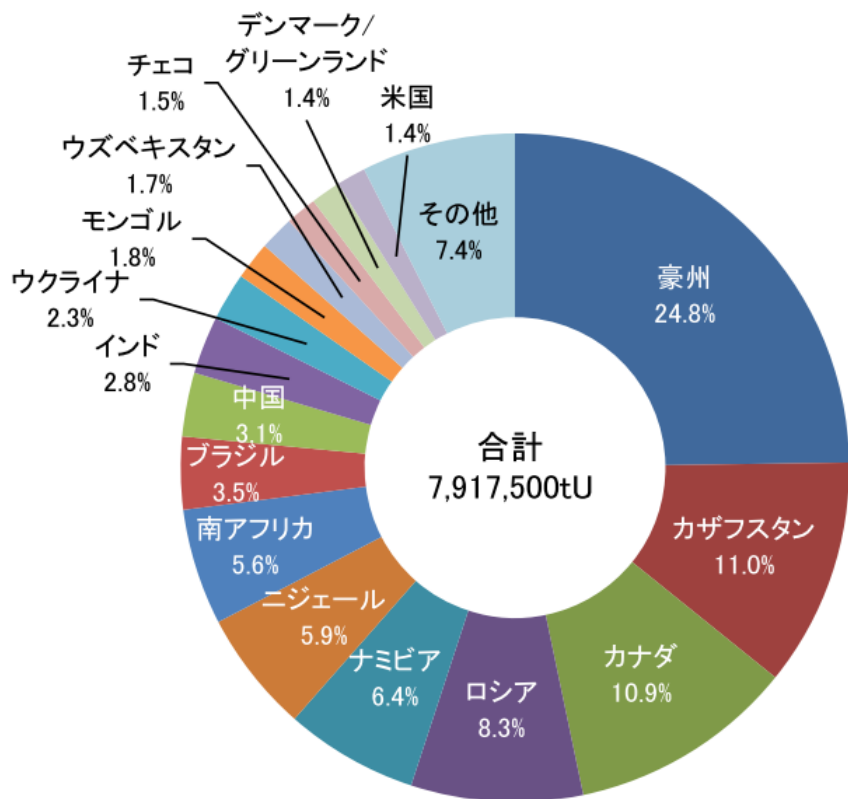
【第122-2-13】デジタル技術を活用した電源の多様化・分散化・最適化



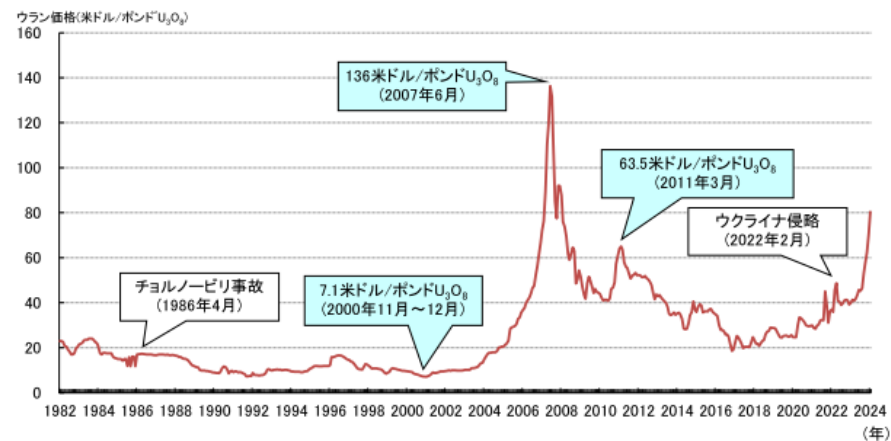
出典：経済産業省「再生可能エネルギーの大量導入を支える次世代電力ネットワークの構築について」より抜粋

ウラン資源量とコスト

【第222-2-6】世界のウラン既知資源量(2021年)



【第222-2-7】ウラン価格(U₃O₈)の推移



資料：IMF「IMF Primary Commodity Prices」を基に作成

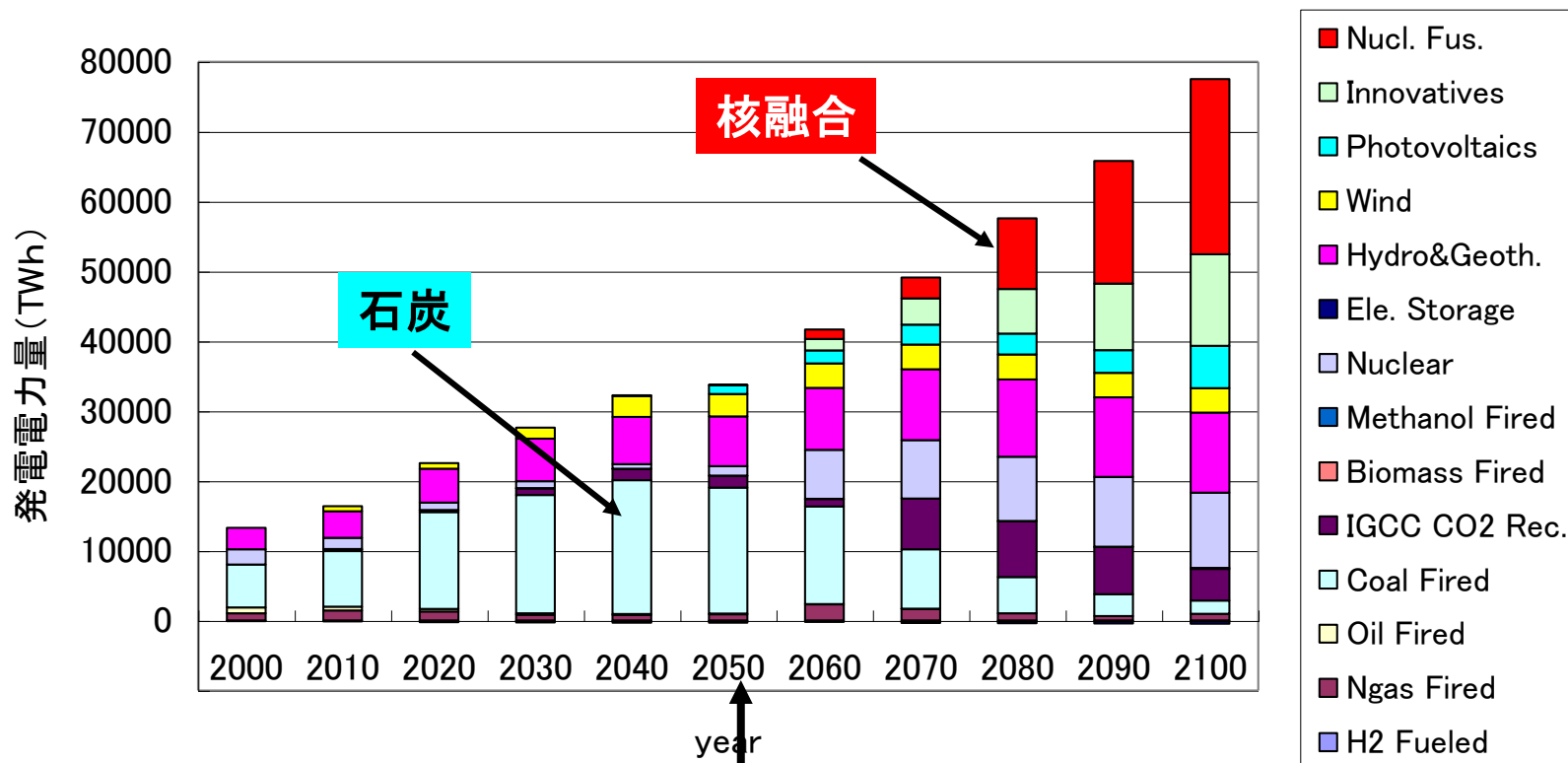
(注1) ウラン既知資源量とは260米ドル/kgU以下のコストで回収可能な埋蔵量のこと(2021年1月1日時点)。

(注2) 2020年の世界のウラン需要量は6.01万トンU。

資料：IAEA・OECD/NEA「Uranium 2022: Resources, Production and Demand」を基に作成

フュージョン・エネルギーのエネルギー問題への寄与

最大建設可能速度制約ケース、導入時点2050年 (550ppm濃度制約)
-導入初年度発電コスト66mill/kWhまで下げる必要がある-



核融合炉 1号機

TOKIMATSU, K., et al., Nuclear Fusion 42 (2002), 1289.

==> 21世紀後半の環境問題に対して核融合が有為な貢献を果たすためには、核融合炉の21世紀中葉での実用化が必要

新電源に求められる要件

- 安全
- 安定
- 安価
- 環境適合性
- 持続可能性（先進国としての責務も含む）

エネルギー安全保障（安定性）

□ 地政学的リスク

各国の政治・軍事情勢

外交ツール（原油禁輸、パイプラインの送ガス停止等）

国際関係

□ 地質学的リスク

埋蔵量の減少

資源の偏在

□ 国内供給体制リスク

設備投資減退（設備老朽化）

技術開発停滞

□ 需要逼迫リスク（計画停電）

□ 市場価格リスク（オイルショック）

□ 天災・事故リスク（東日本大震災）

電力の現状についてのまとめ

- 電力の必要性は増加し、必要量も増加する
- 安定性、経済性、環境性の重視度の考え方は政治、地域性、経済状況等から決まる。確定された概念はない。
- 持続性の観点

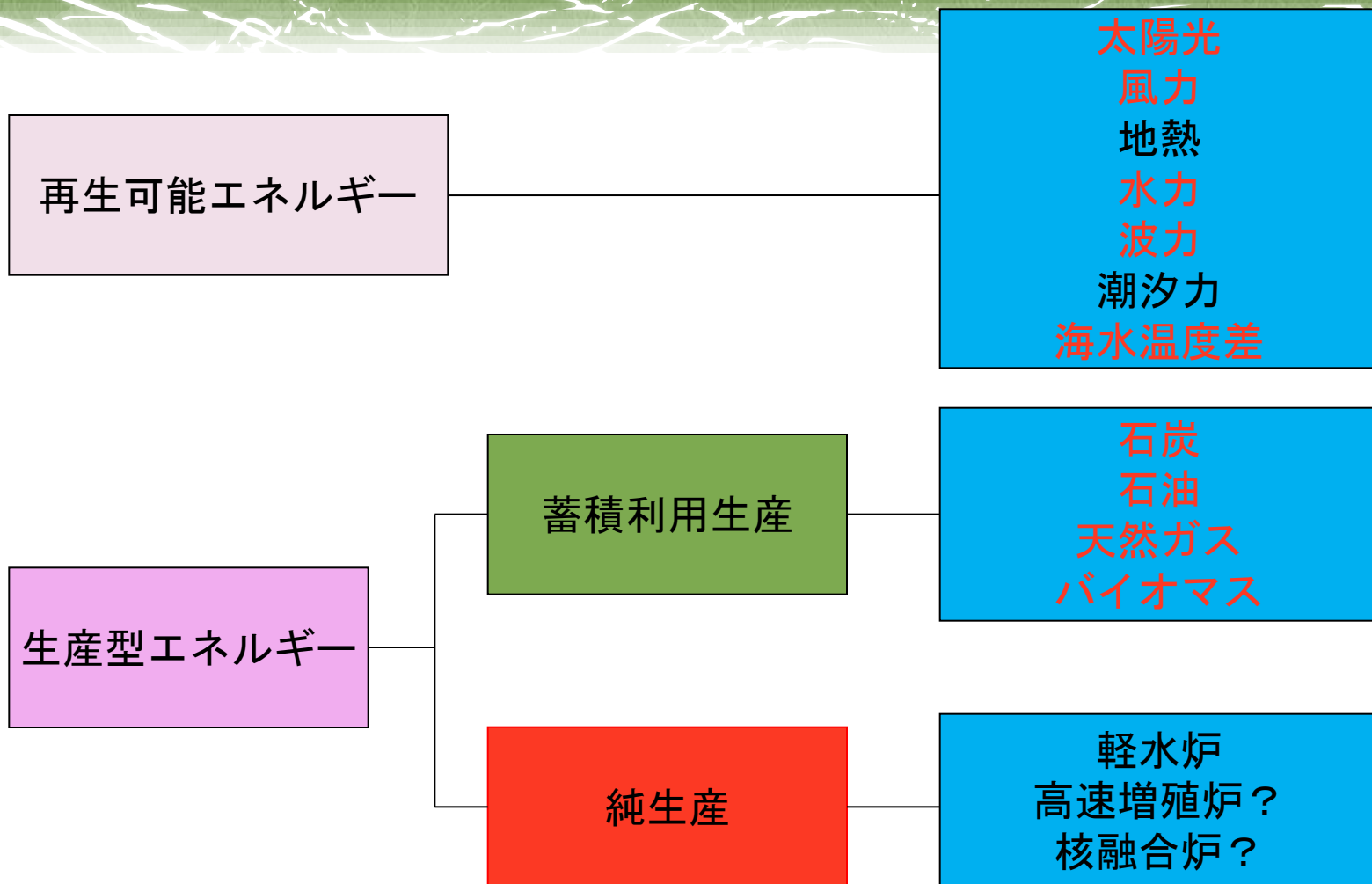


各種電源をバランスよく混ぜる
ベストミックスを持続させること



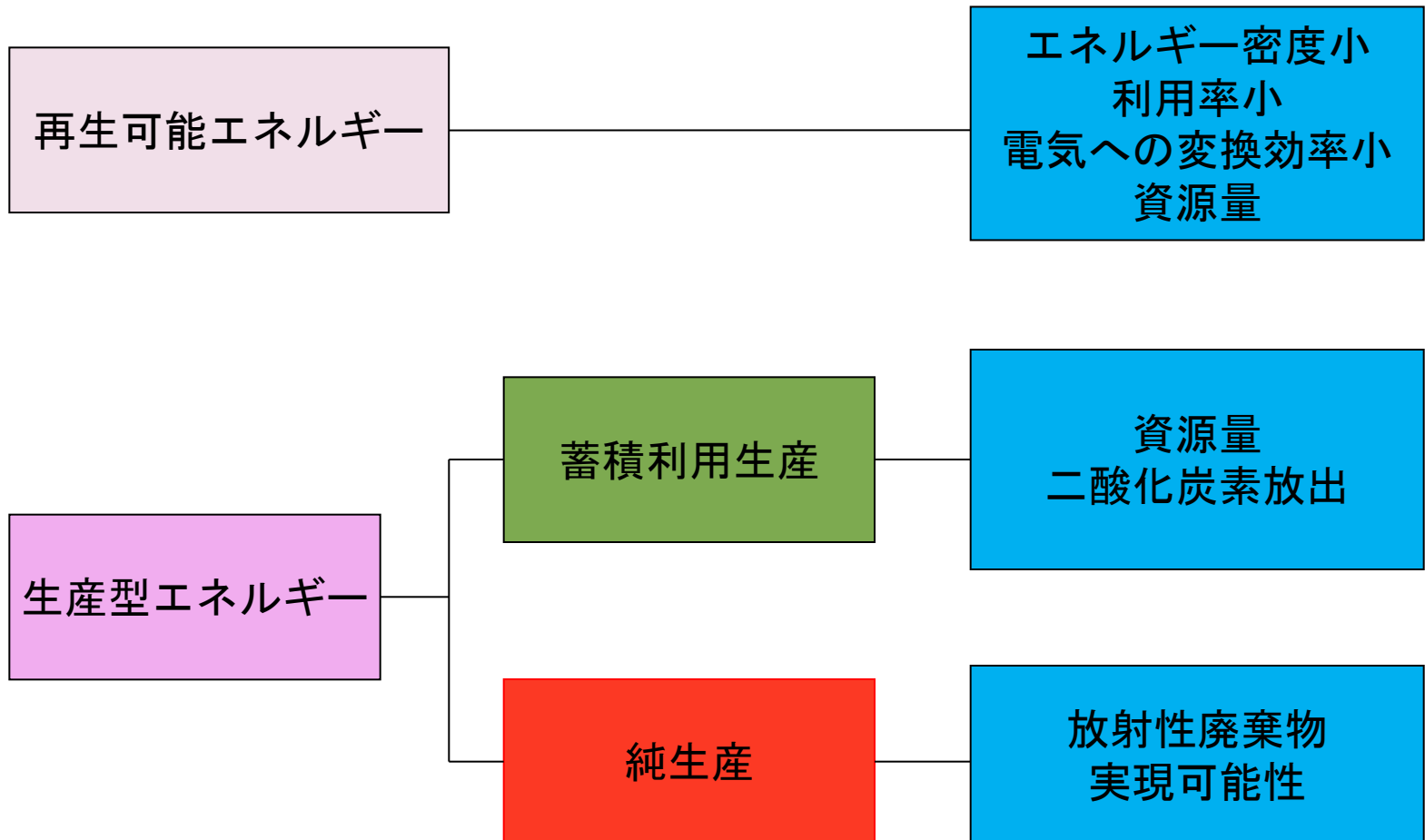
原子力、火力に代わる新型電源の開発が必要

エネルギー源の分類

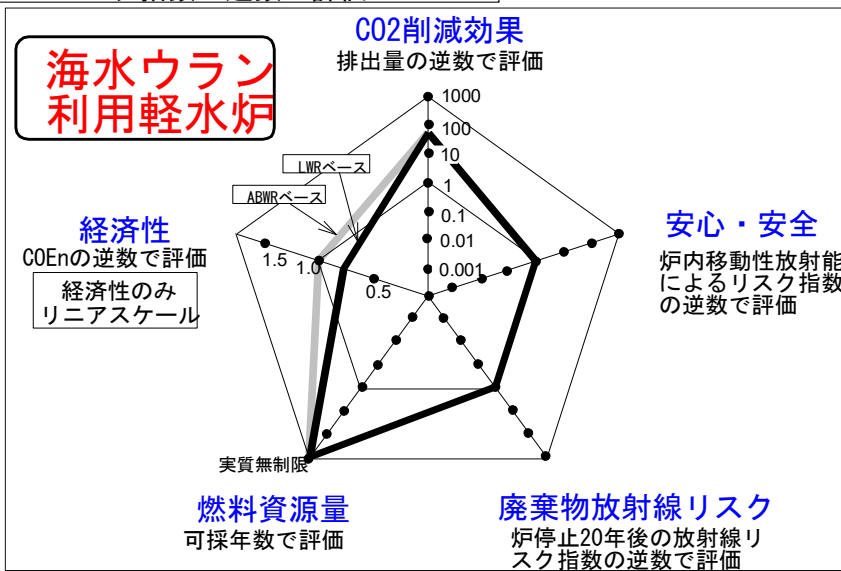
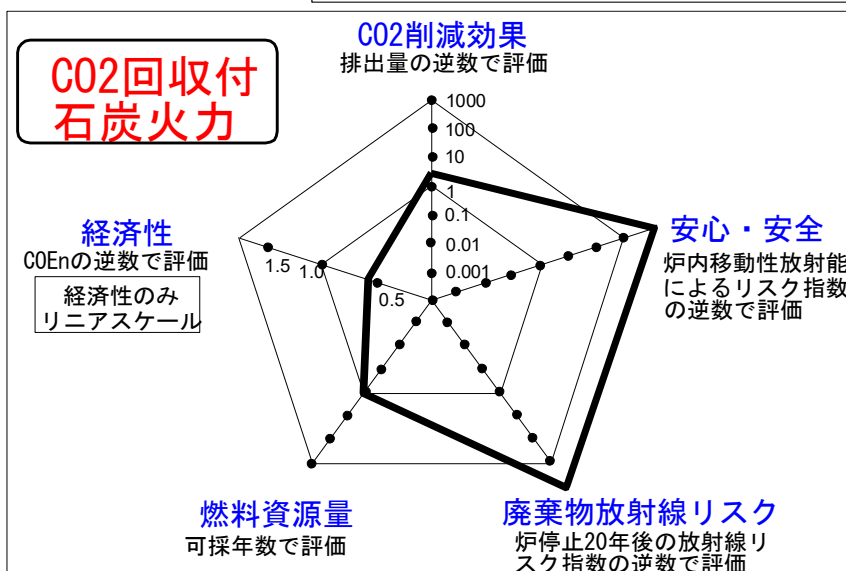
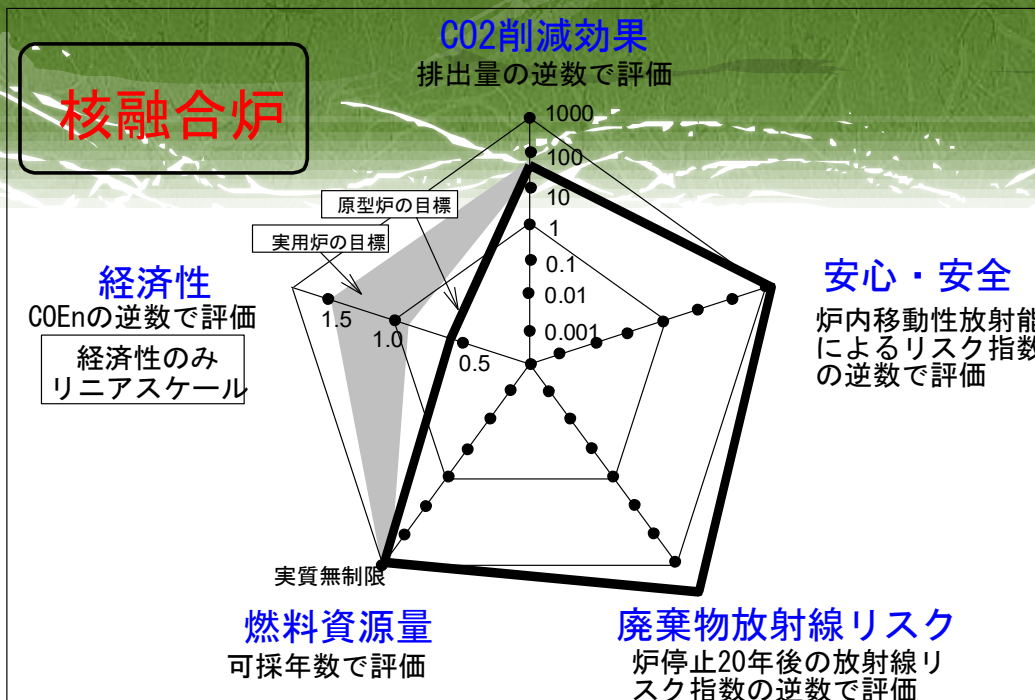


注) 赤字は太陽エネルギーに起因する。黒字は地球内部のエネルギー

各エネルギー源の問題点のまとめ



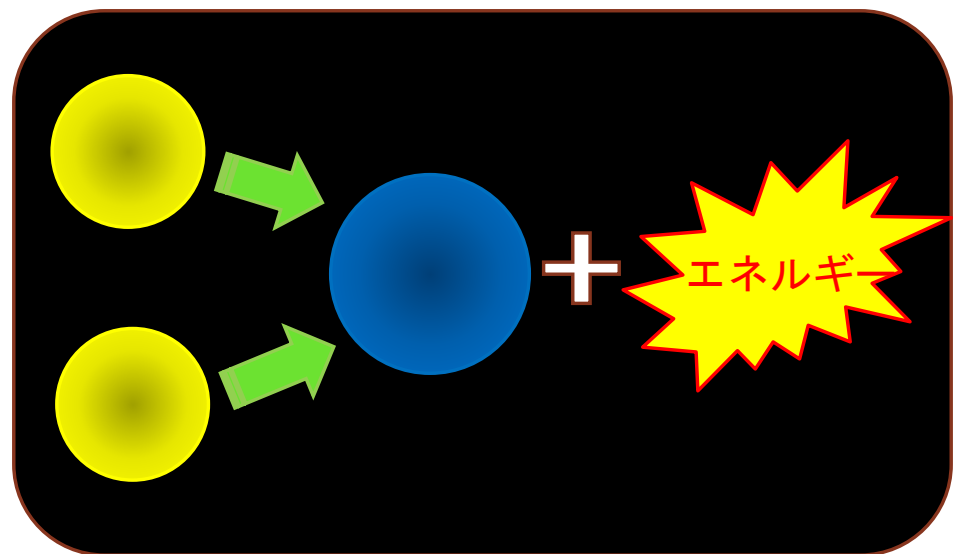
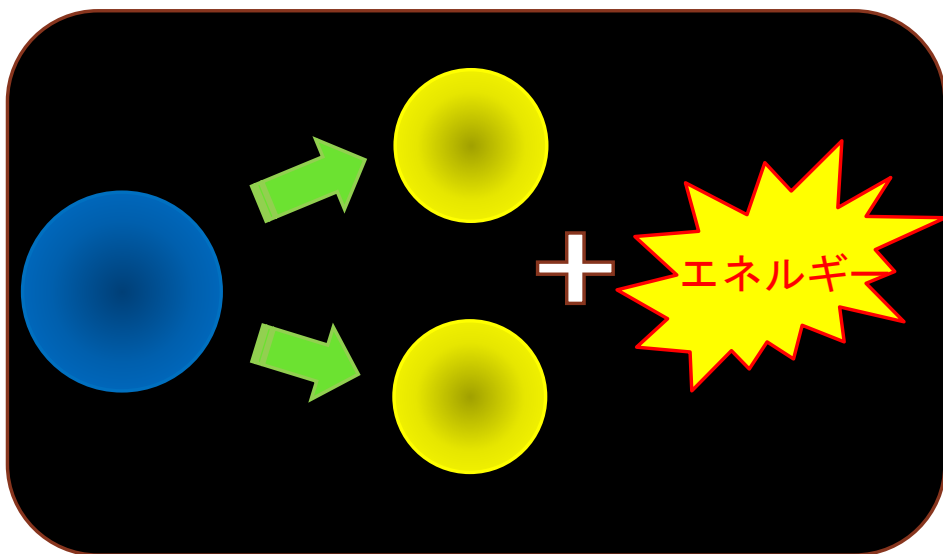
各種エネルギー源の総合評価



核融合と核分裂の違い

くっついているものが分かれてエネルギー発生

分かれているものがくっついてエネルギー発生



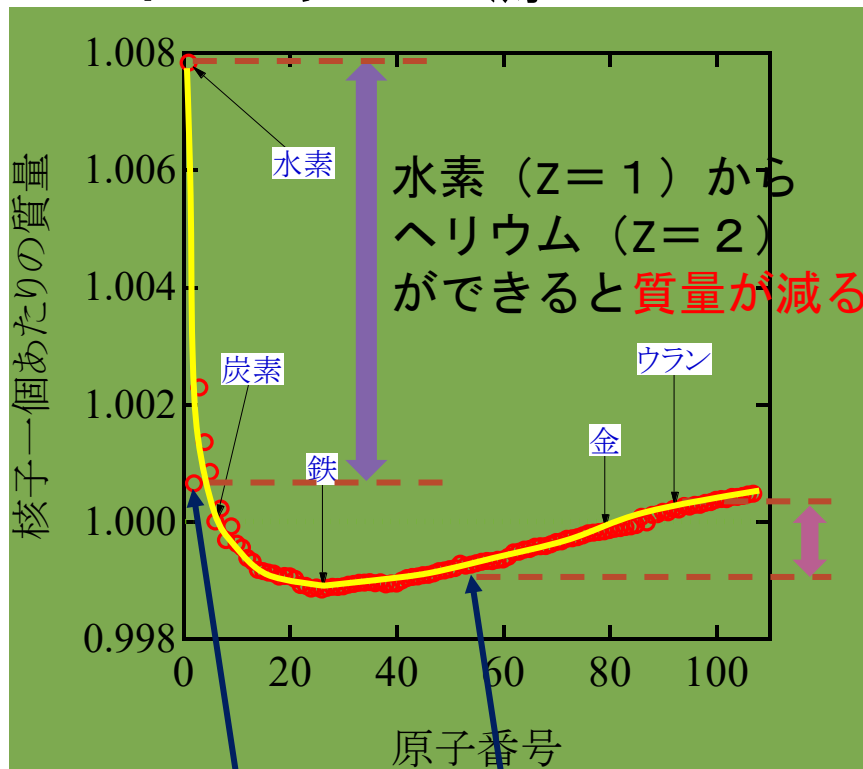
核分裂

核融合

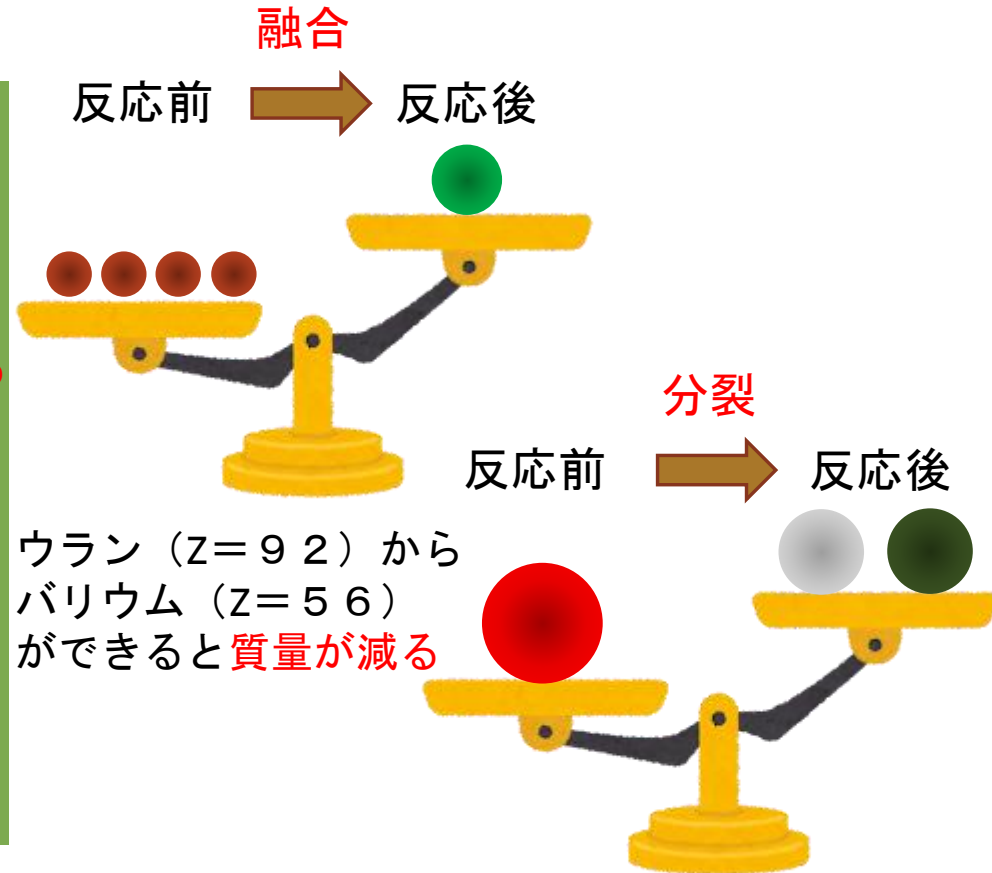
フュージョン・エネルギーとは？

- エネルギーを取り出すには質量が減ることが必要
- 軽い元素は融合、重い元素は分裂で質量が減る

エネルギーの源は $E=mc^2$

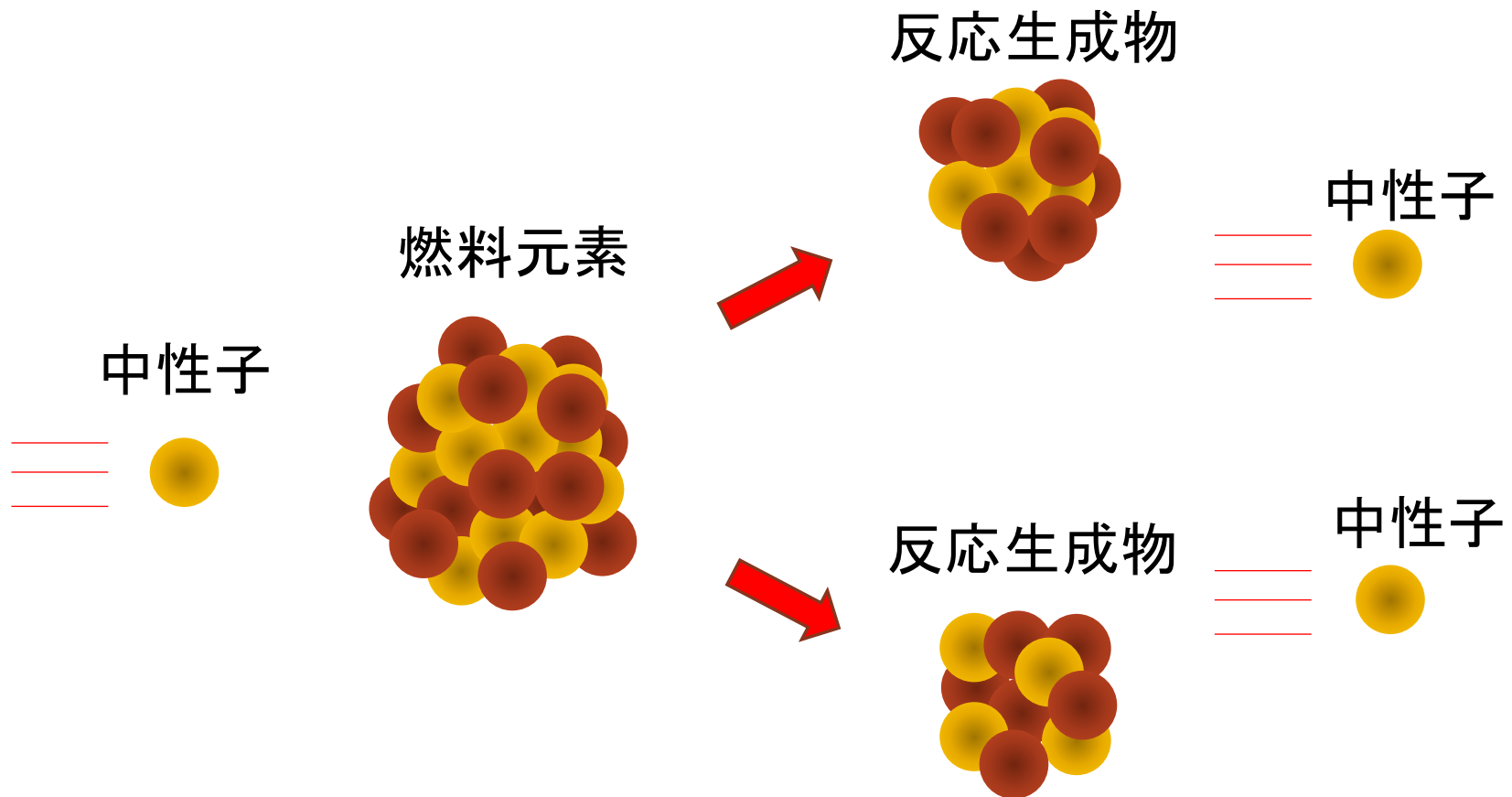


ヘリウム バリウム



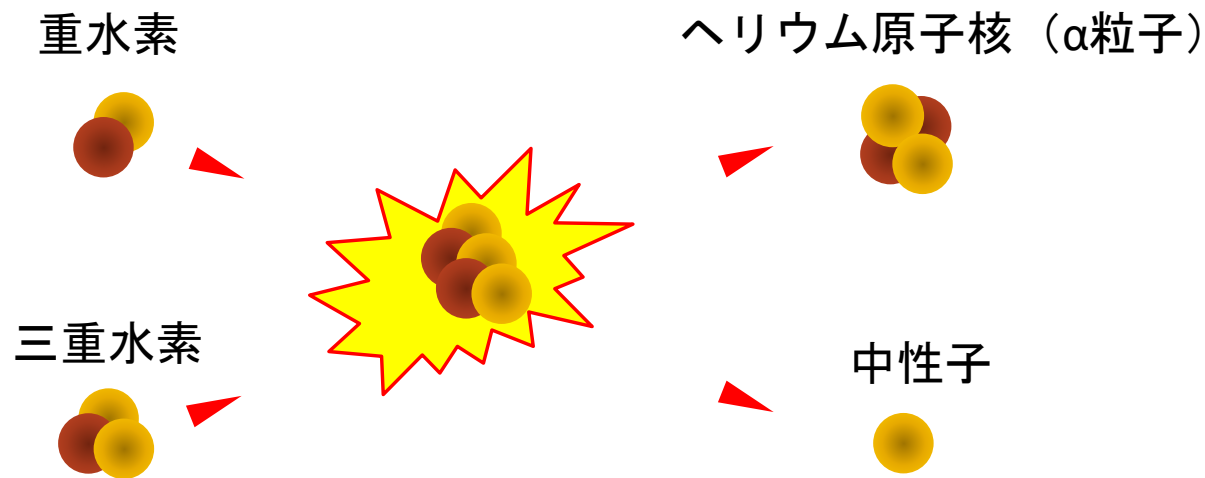
元素を分裂させるには？

- 一つの中性子が重い元素に衝突して分裂をさせる
- この反応で、2つ以上の中性子が生成されると、その中生子が次の燃料元素に衝突することで**爆発的**に反応が進む。
- 制御には中生子が次の燃料元素に衝突しないようにする。

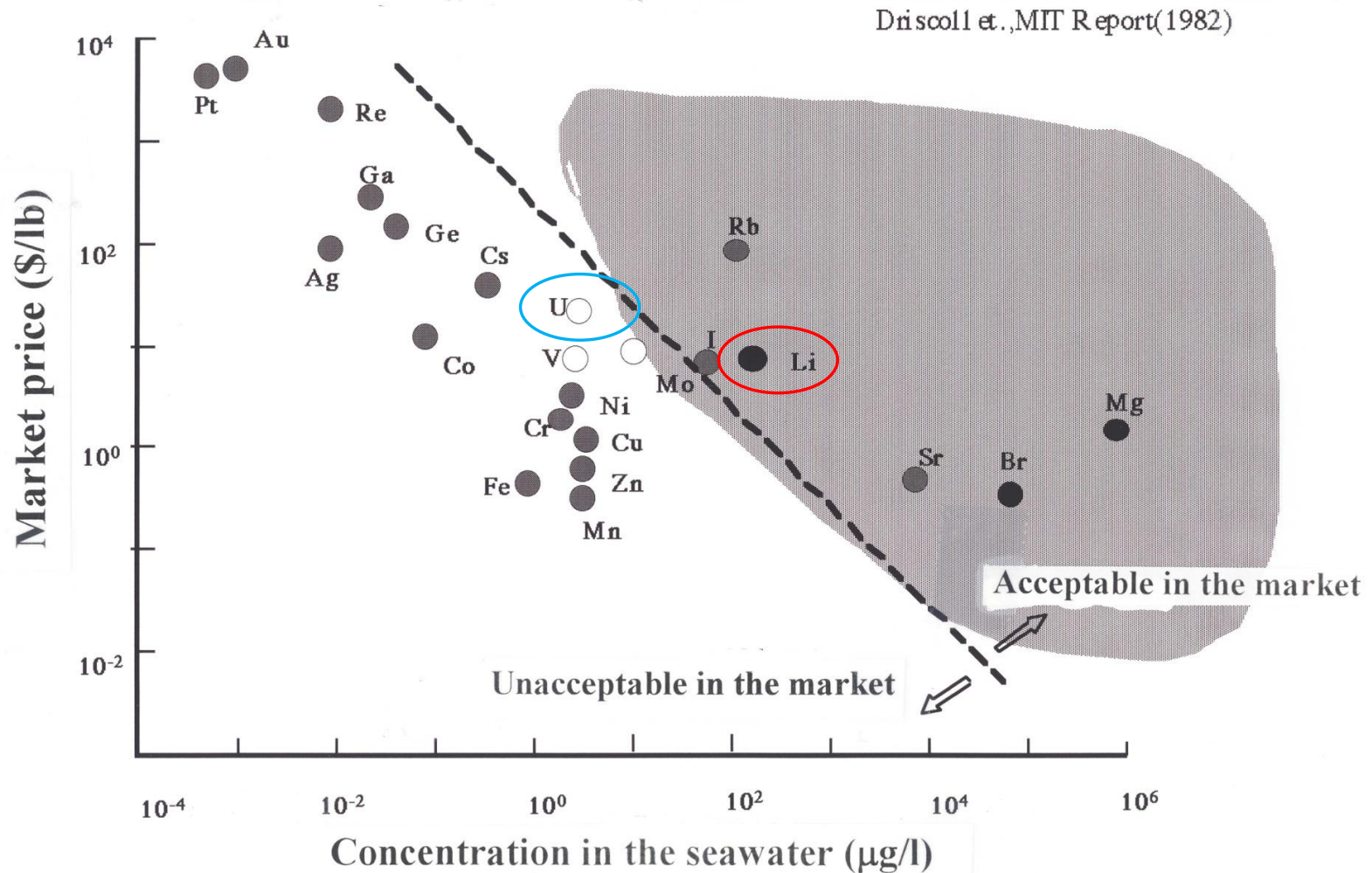


地上で利用する核融合反応とは？

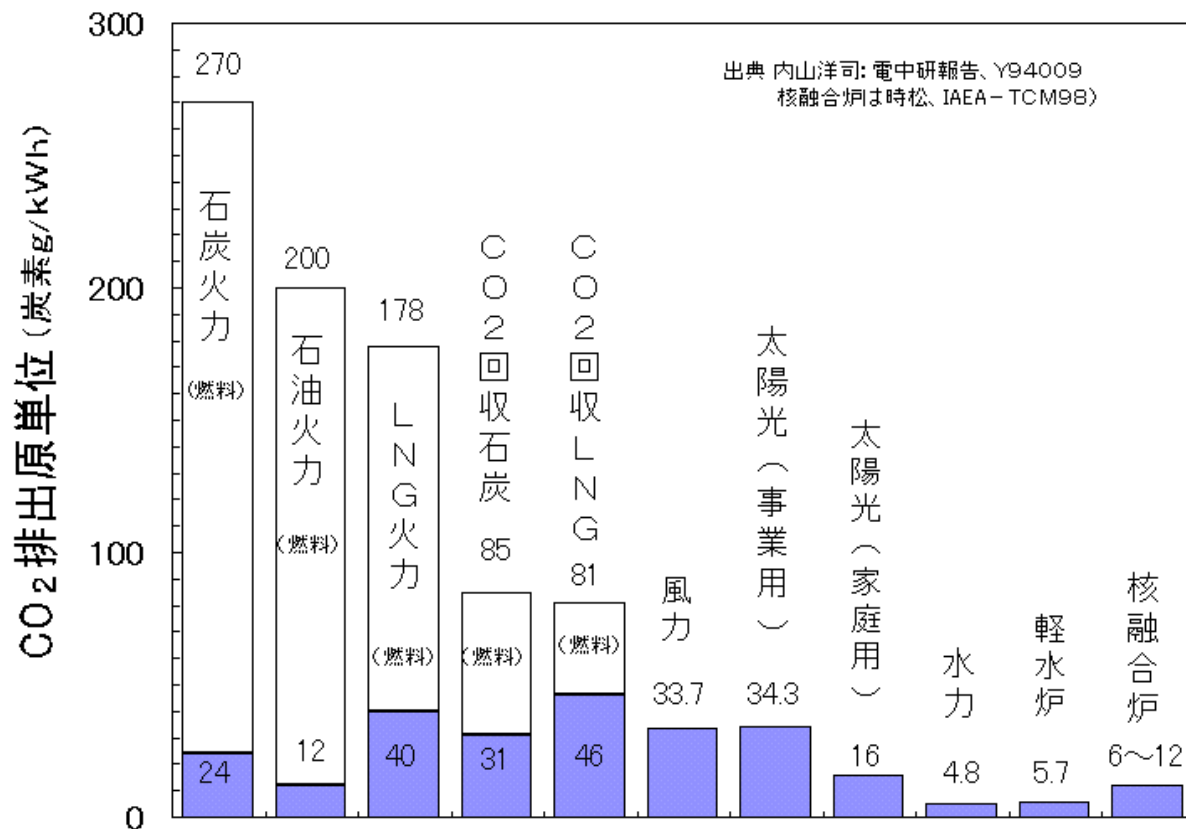
- 重水素と三重水素が融合してエネルギーを生み出す。エネルギー密度は極めて高く、燃料 1 g で石油 8 トン分のエネルギーを放出
- この反応で、生成された α 粒子と中性子は次の融合反応とは無関係なのでゆっくりと反応が進む。
- α 粒子のエネルギーは重水素と三重水素の加温に使われる



海水からの資源の回収

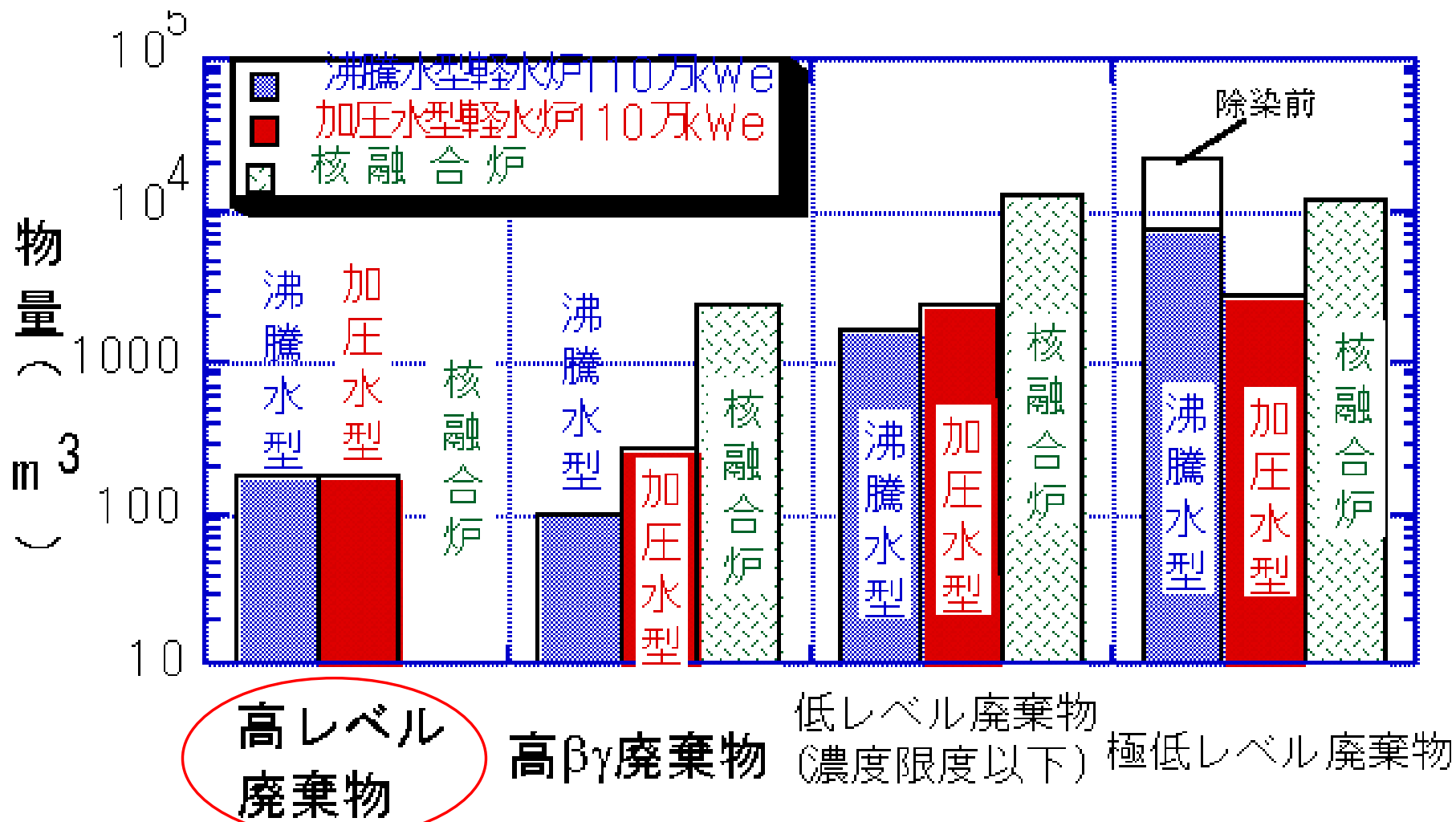


各種発電方法のCO₂排出量

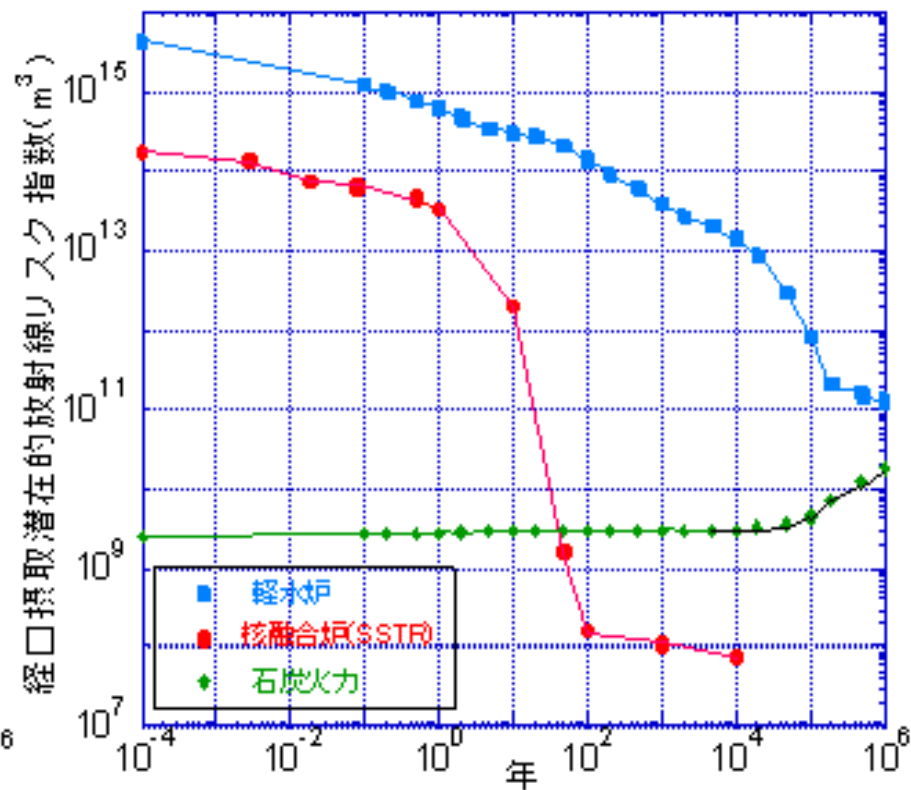
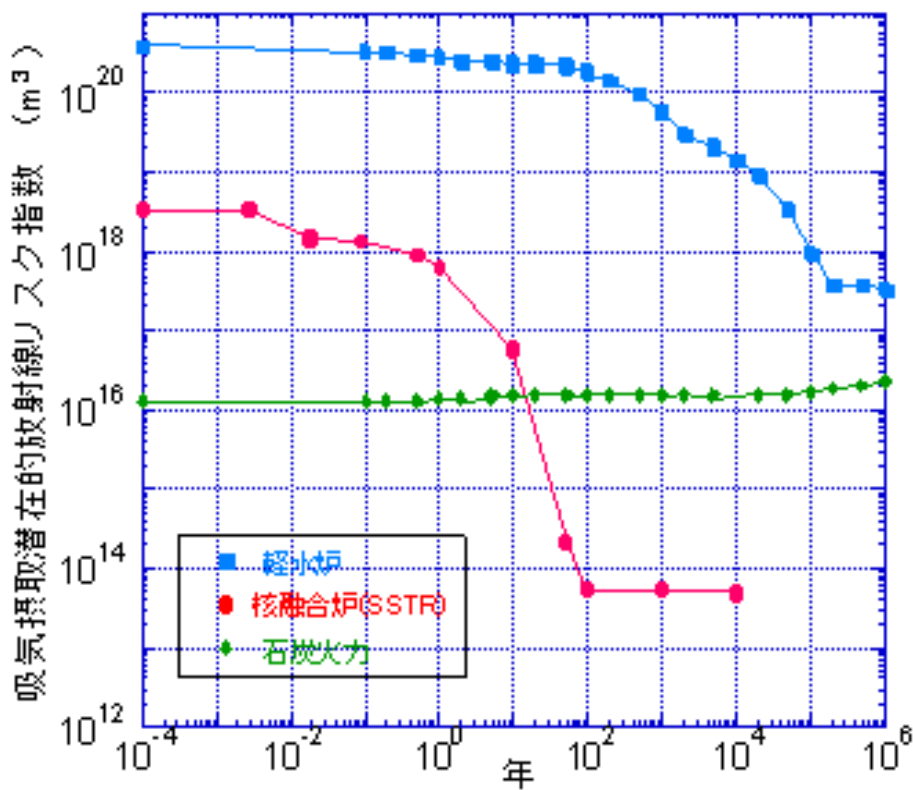


各種電源別の二酸化炭素排出量

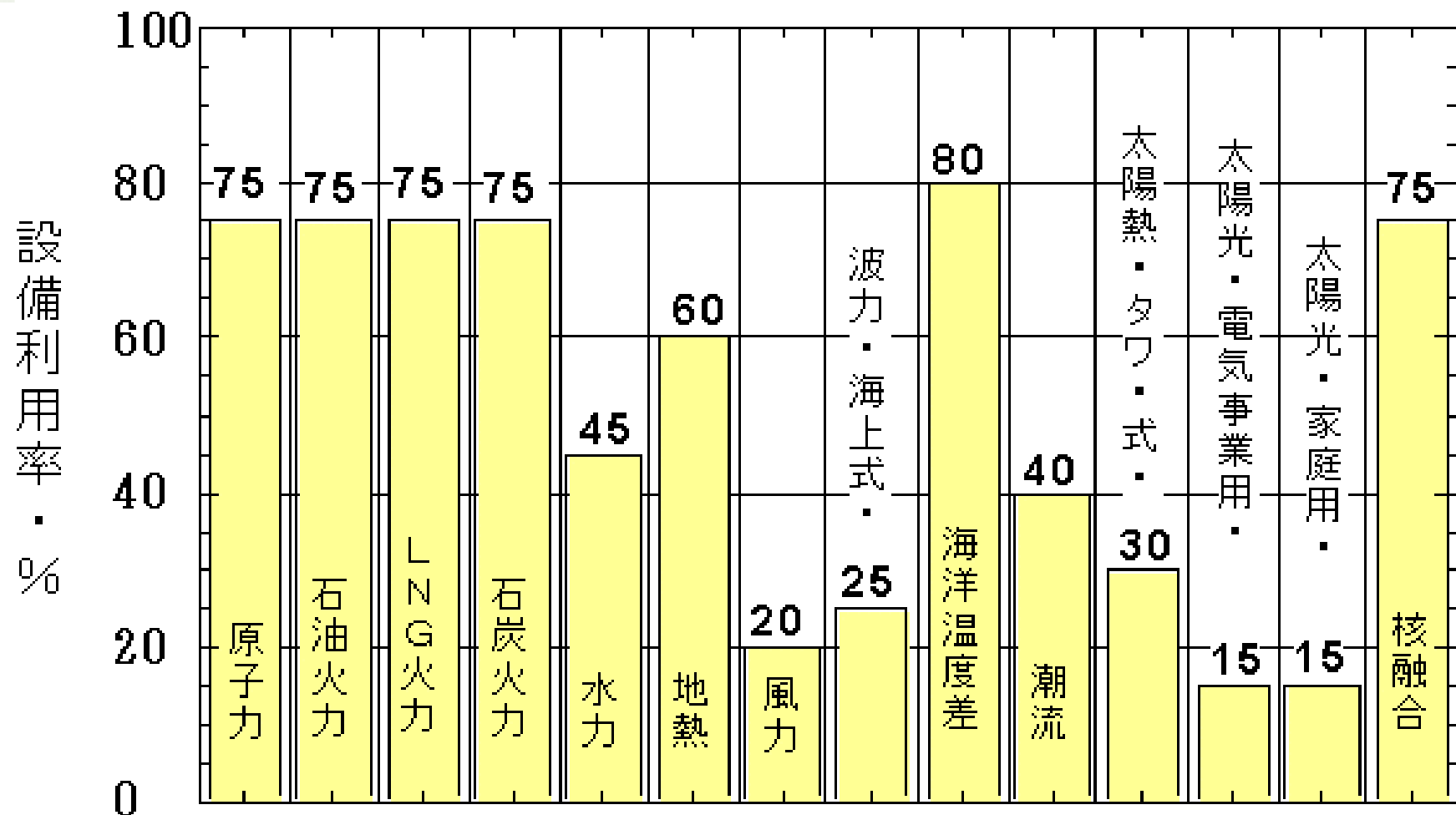
放射性廃棄物の比較



放射線リスクの比較

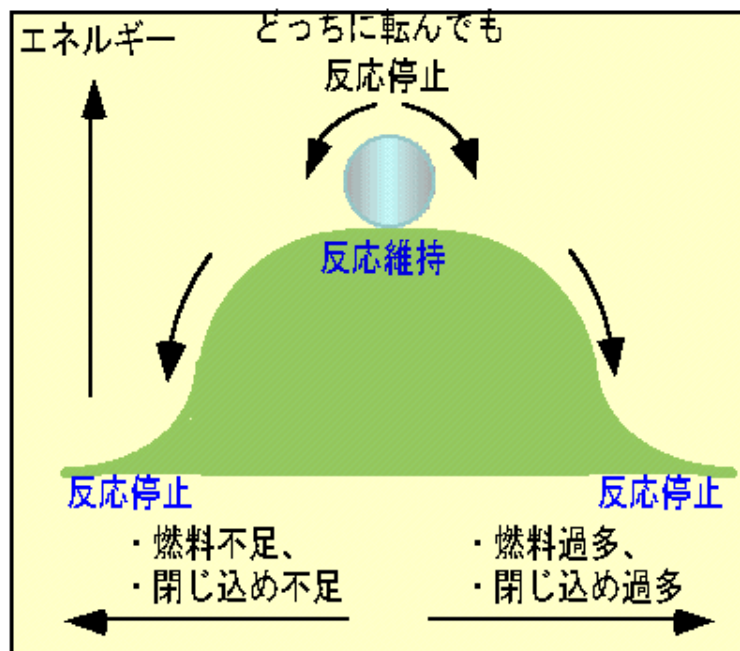


設備利用率の比較



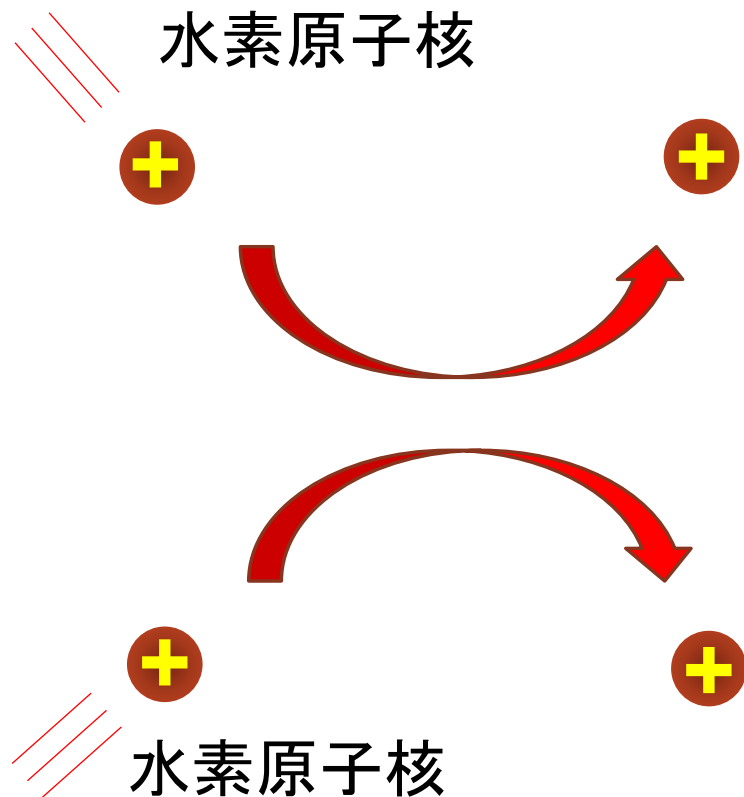
核融合はクリーンか？ 安全か？

- ・ 原子炉の安全性は、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」が原則
- ・ 核融合では、主に【閉じ込める】に注意を集中
 - ――>核的暴走を原理的に起こさない

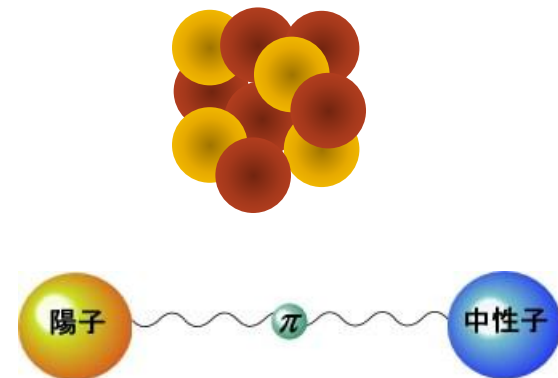


元素を融合させるには？

- 水素原子核同士を衝突させようとしても同じ電荷のため反発するため通常はこの反応は起きない。

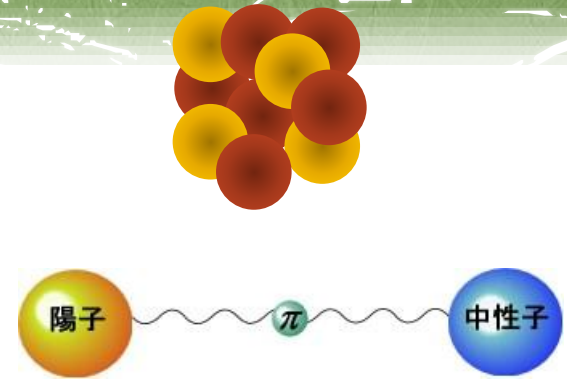
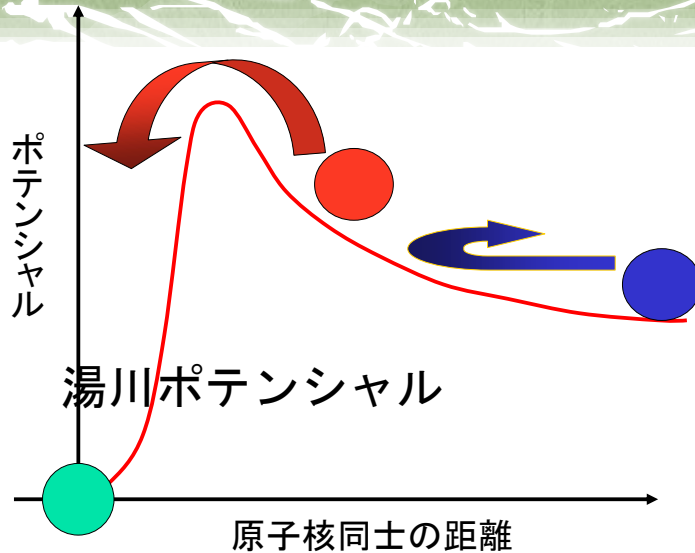


原子核はどうしてくっついてるの？



原子核はなぜくっついているの？

湯川秀樹博士 (1907-1981)

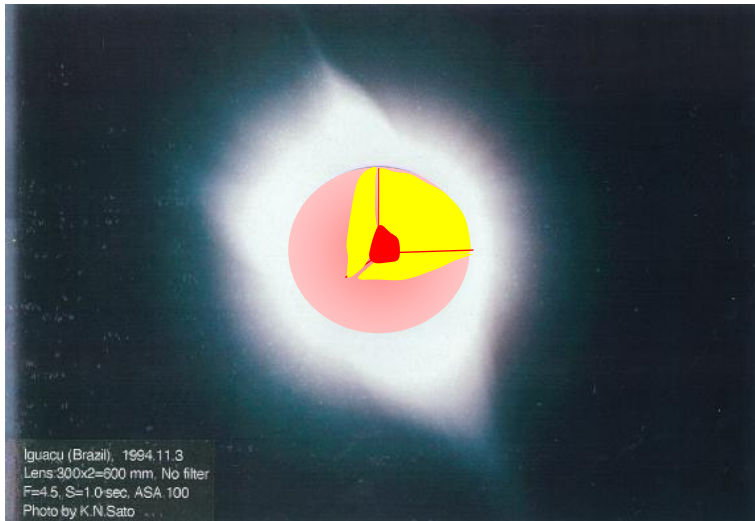


核力の源：パイ中間子の予言(1935年)
1949年 ノーベル物理学賞受賞

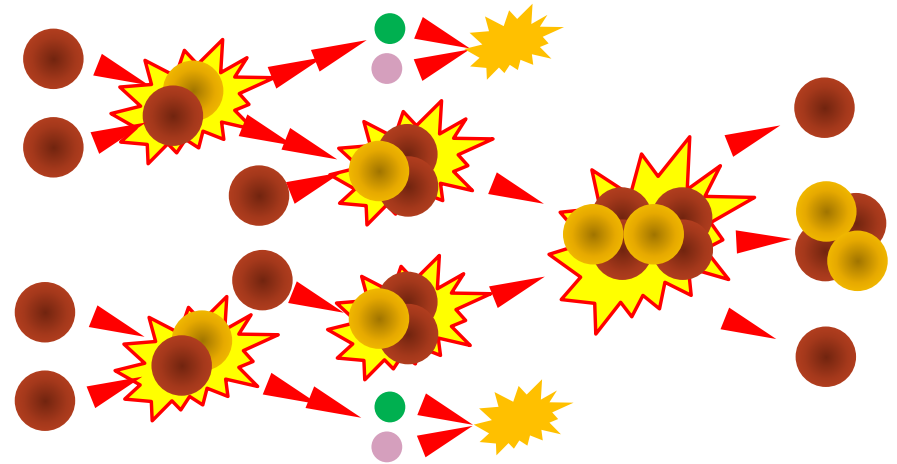
- 1955年8月 第1回原子力平和利用国際会議において
核融合研究が平和利用に向けて公開
- 1957年2月 原子力委員であった湯川教授の尽力に
より、核融合反応懇談会が開催
- 1958年 「核融合懇談会」(湯川秀樹会長)設立
- 1958年7月 研究連絡誌「核融合研究」発刊
- 1960年5月 日本学術会議・核融合特別委員会(湯川秀樹部会長)、プラズマ研究所
創設へ
- 1983年 「核融合懇談会」は「プラズマ・核融合学会」へ継承・発展







フュージョン・エネルギーとは？

太陽のエネルギー源



太陽内での反応

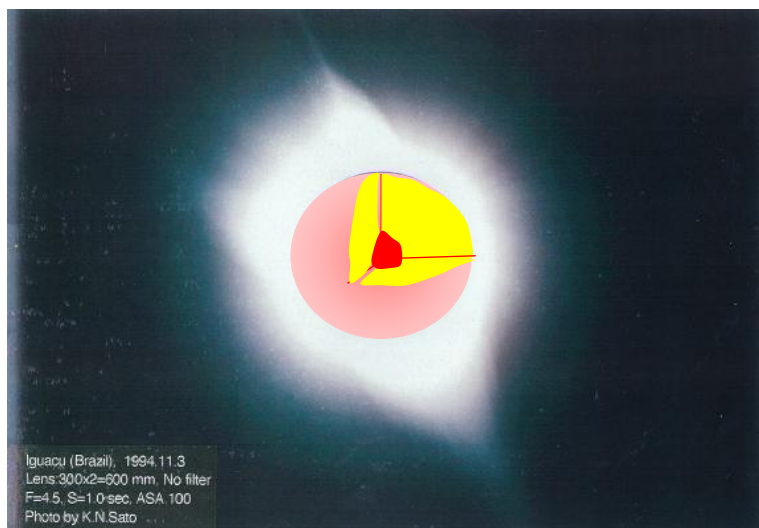


-  P : 水素原子核
-  D : 重水素原子核
-  e : 電子
-  e⁺ : 陽電子
-  3He : ヘリウム 3 原子核
-  4He : ヘリウム原子核

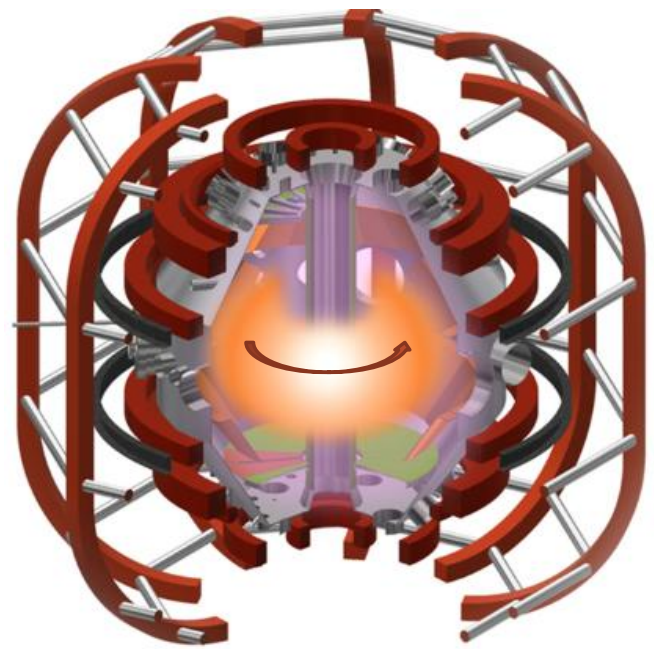
1億度の粒子を閉じ込めておくには磁場を使うか、強力なレーザーで圧縮する。

- 地上では太陽のような強力な重力は得られない。
- 別の力を利用する。

太陽：重力：球形



地上：電磁力：トーラス

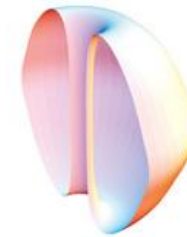
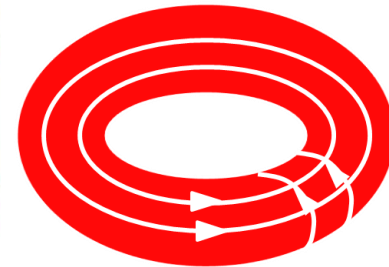
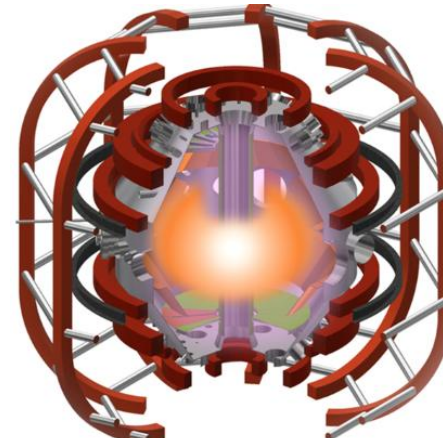
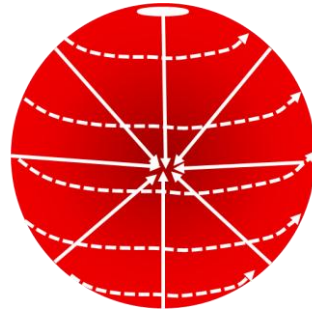
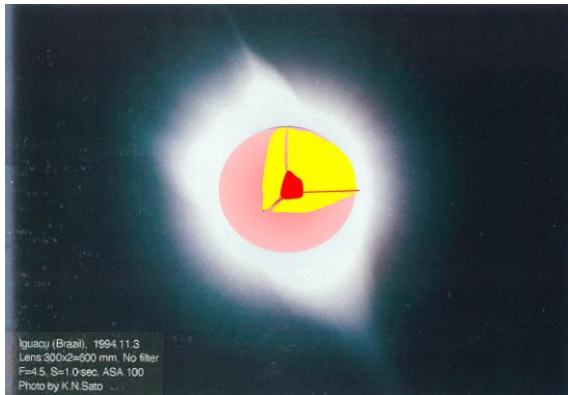


地上で1億度の粒子を閉じ込めておくには磁場を使うか、強力なレーザーで慣性力で圧縮する。

- 地上では太陽のような強力な重力は得られない。
- 別の力を利用する。→慣性力、電磁力

太陽: **重力**: 球形、レーザー核融合: **慣性力**: 球形

磁場核融合: **電磁力**: トーラス



Advanced Tokamak

Spherical Torus

Compact Stellarator

○永遠のエネルギーを目指して

21世紀の地球環境に調和するエネルギーの開発

●優れた環境性

地球の温暖化の原因となる二酸化炭素などの発生が少ない。
廃棄物の放射能の量は比較的短い期間ですみやかに減少する。

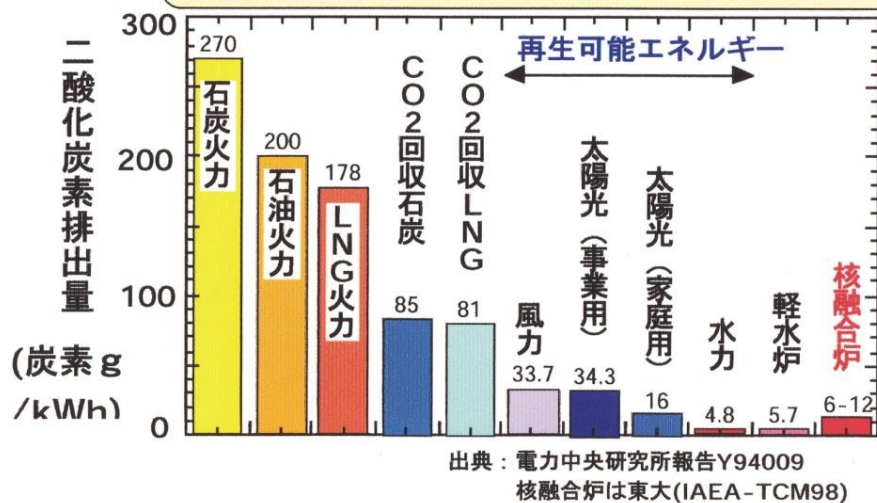
●高い安全性

核的暴走がない。
崩壊熱密度が小さい。

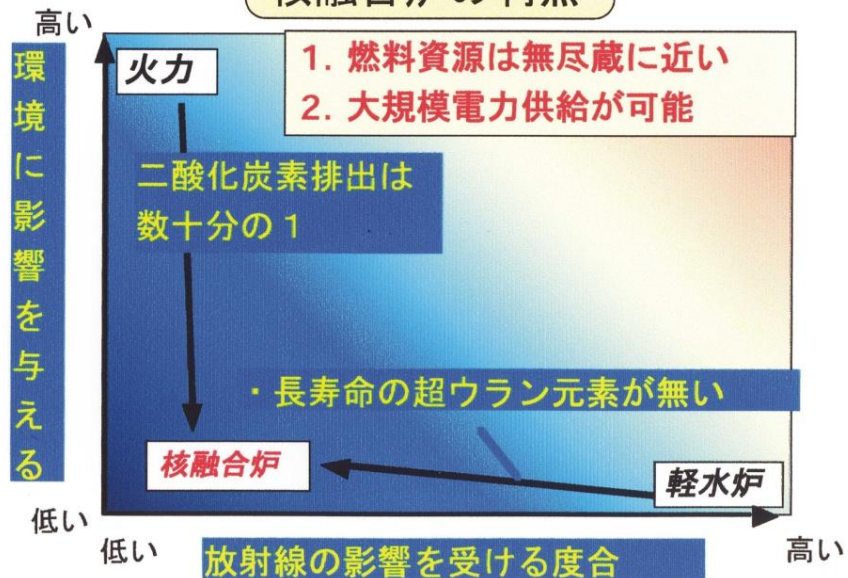
●豊富な資源

重水素は、海水中に豊富に存在。
三重水素は、埋蔵量の多いリチウムより生成可能。

発電システムの二酸化炭素排出率



核融合炉の利点

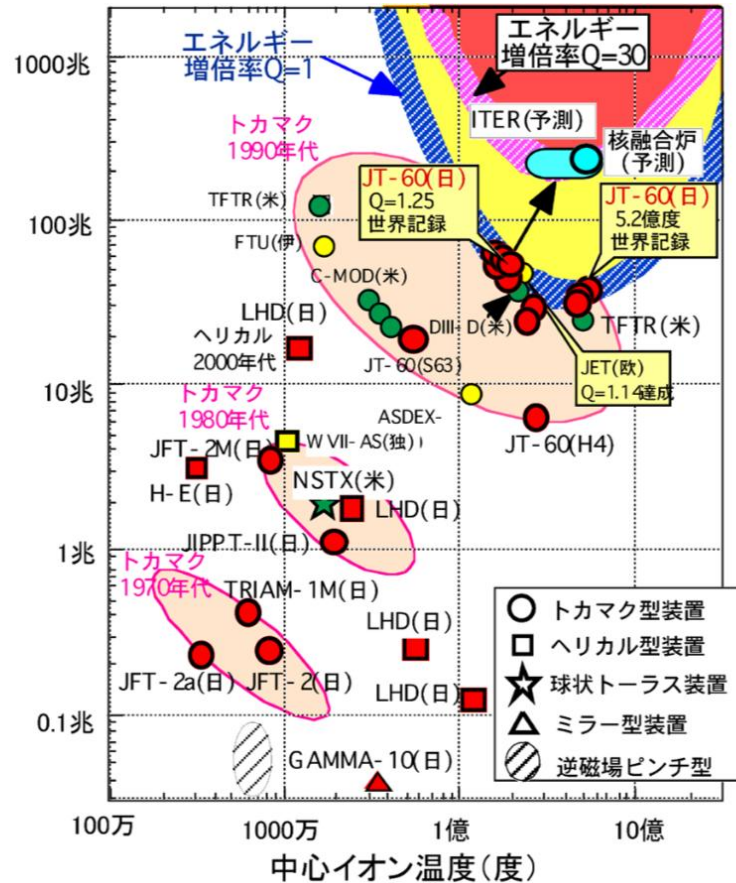


- ・核拡散の心配が少ない
- ・開発途上国への技術導入の障壁が少ない

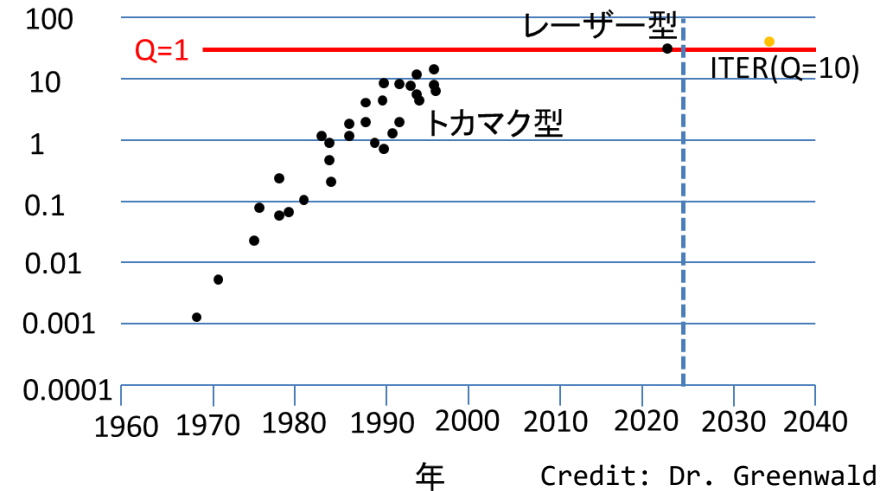
100秒間 1億度の粒子を閉じ込める？ 核融合 3重積の発展

核融合 3重積は半導体性能よりも早く進展してきた。
ITERの建設に時間を要して進展の停滞も見える。

閉じ込め時間 × 中心イオン密度 (秒・個 / 立方センチ)



核融合 3重積



核融合 3重積の進展は半導体性能の
年次発展を示すムーアの法則以上の
速度で進展

我が国でのフュージョン・エネルギー研究開発

フュージョンエネルギー研究開発の全体像

- ◆ ITER計画等への参画を通じて科学的・技術的実現性を確認した上で、原型炉への移行を判断。
- ◆ 科学技術・学術審議会 核融合科学技術委員会等における議論を踏まえ、原型炉に必要な技術開発の進捗を定期的に確認しつつ、研究開発を推進。

SBIRフェーズ3基金 (Small Business Innovation Research)

✓ 中小企業イノベーション創出推進基金を造成し、スタートアップなどの有する先端技術の社会実装を促進



核融合の挑戦的な研究の支援の在り方に関する検討会

✓ ムーンショット型研究開発制度を活用し、未来社会像からのバックキャストによる挑戦的な研究開発を推進

未来社会像からのバックキャストによるアプローチ