

2050年原子力技術ビジョン

次世代軽水炉から第4世代原子力
への原子力技術開発戦略



財団法人 エネルギー総合工学研究所

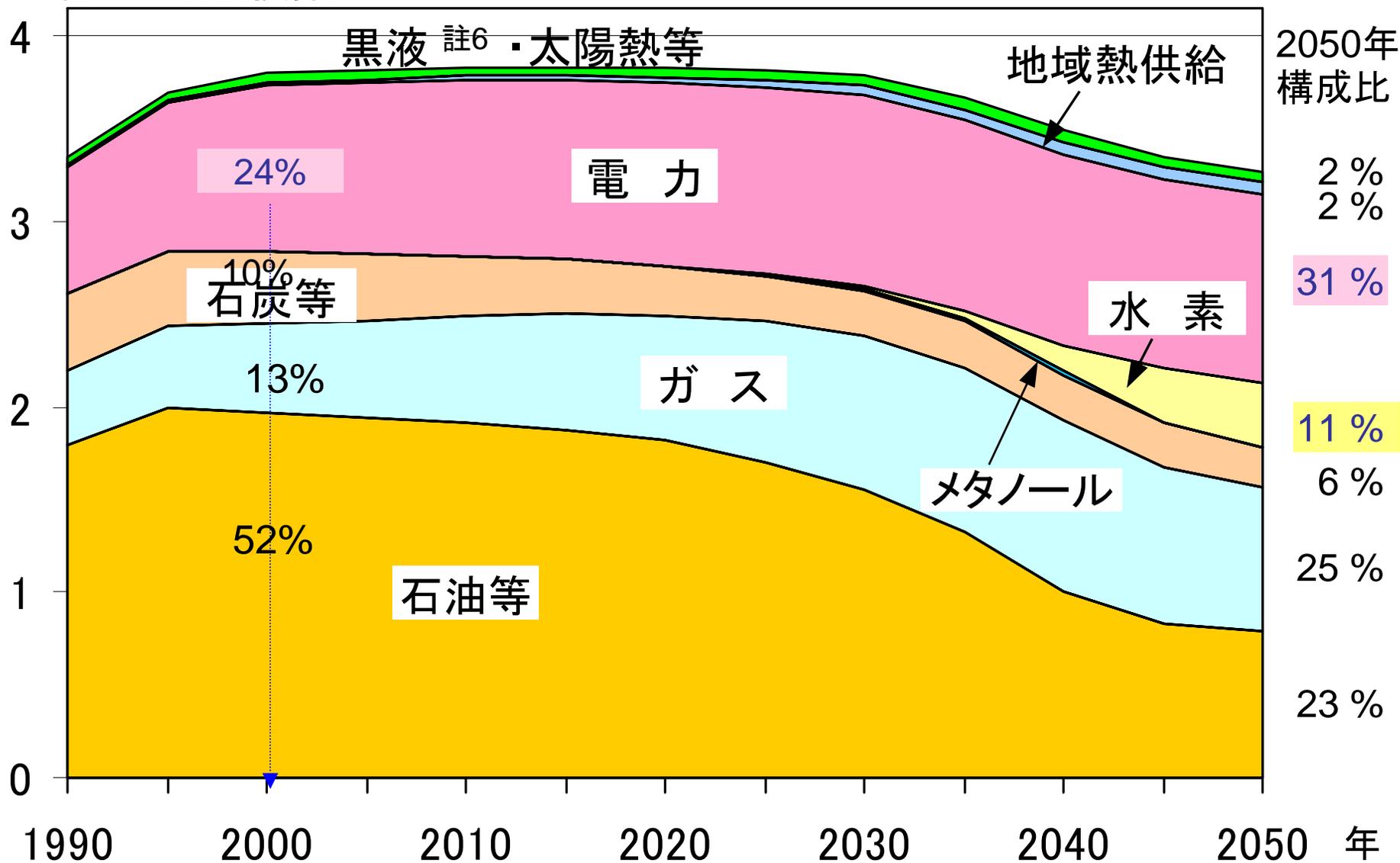
理事 松井 一秋

2050年の原子力： ビジョンとロードマップについて

- 平成14年はじめに近藤先生のイニシアティブで議論開始
- 平成16年11月、日本原子力産業会議（当時）の原子炉開発利用委員会報告
(<http://www.jaif.or.jp/ja/news/2004/1202vision.html>)
- 当時の原子力・産官学にあった萎縮状態に夢と希望を与えんがため

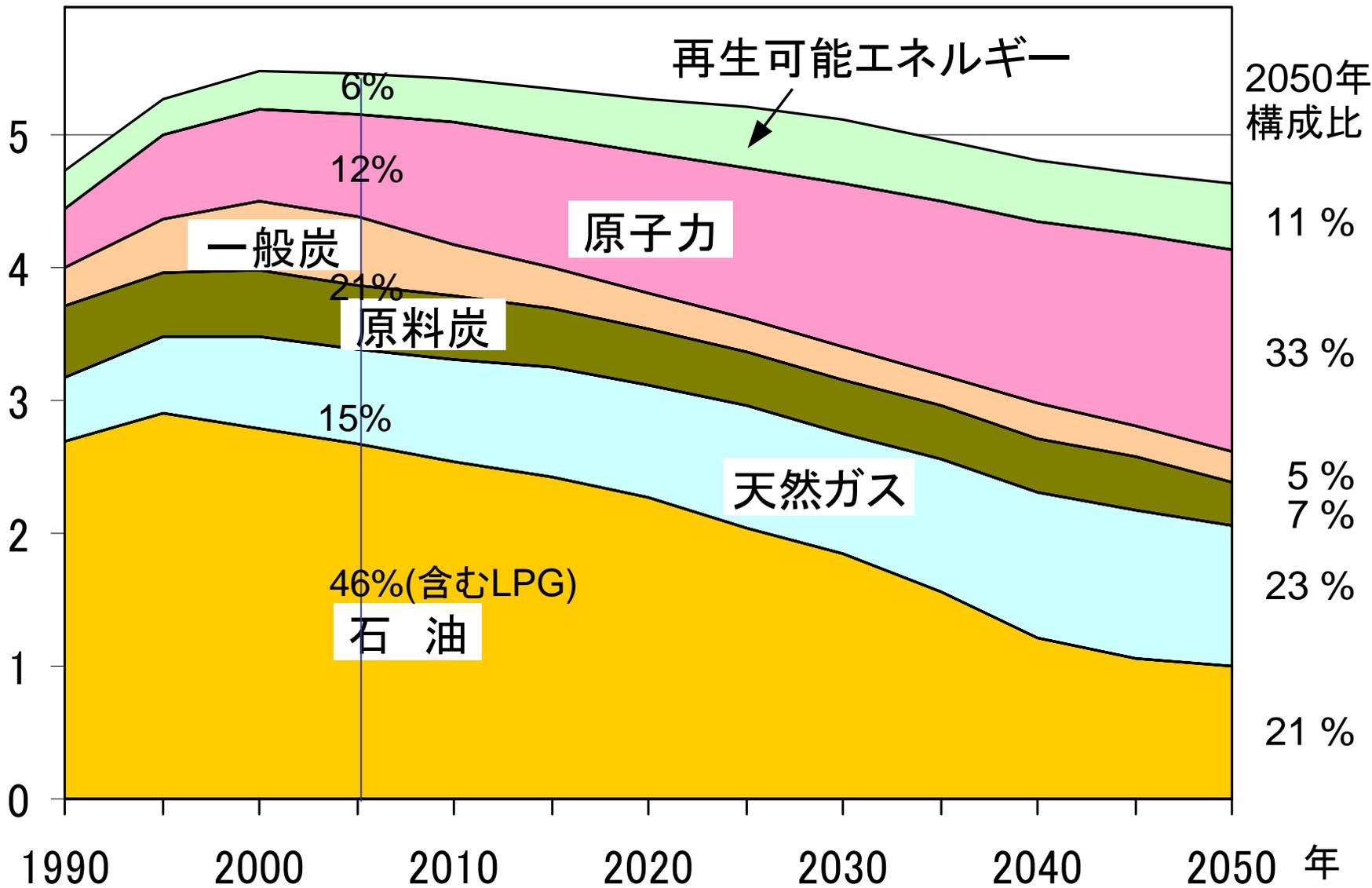
最終エネルギー消費量と構成 (標準ケース)

億トン(石油換算)



一次エネルギー供給量と構成

億トン(石油換算)



(1) 発電に寄与する原子力

- 最終エネルギー消費に占める石油の割合は1/4以下と大幅に減っている。
- 消費エネルギーにおいて、電力の割合は現在の約1/4から、2050年には3割強になっている。
- 電力において、原子力の割合は、21世紀初頭に3割強であったのが、2050年には6割になっている(9000万kW)。

(8) 世界における原子力利用の進展

- 長期にわたって原子力施設の安全な運転管理が行われている。
- 原子力活動の透明性がますます高まっている。
- IAEAの国際保障措置の機能の充実(核拡散に対する懸念の低下)により、原子力の利用は進展している。
- アジア諸国や欧米諸国では、新規の原子力発電所
の他、水素生産、海水脱塩、地域冷暖房などの熱供給にも原子力が使われている。

(9) 原子燃料サイクルシステムの 整備

- 国際社会においては、軽水炉燃料は、高燃焼度化が図られている。また使用済み燃料は、中間貯蔵施設あるいは地層処分施設において管理されている。
- わが国を含めた一部の国では、プルサーマルも選択されている。
- わが国では、欧米諸国、ロシアなどと協力して、経済性の高い高速増殖炉サイクルシステムを実現させている。

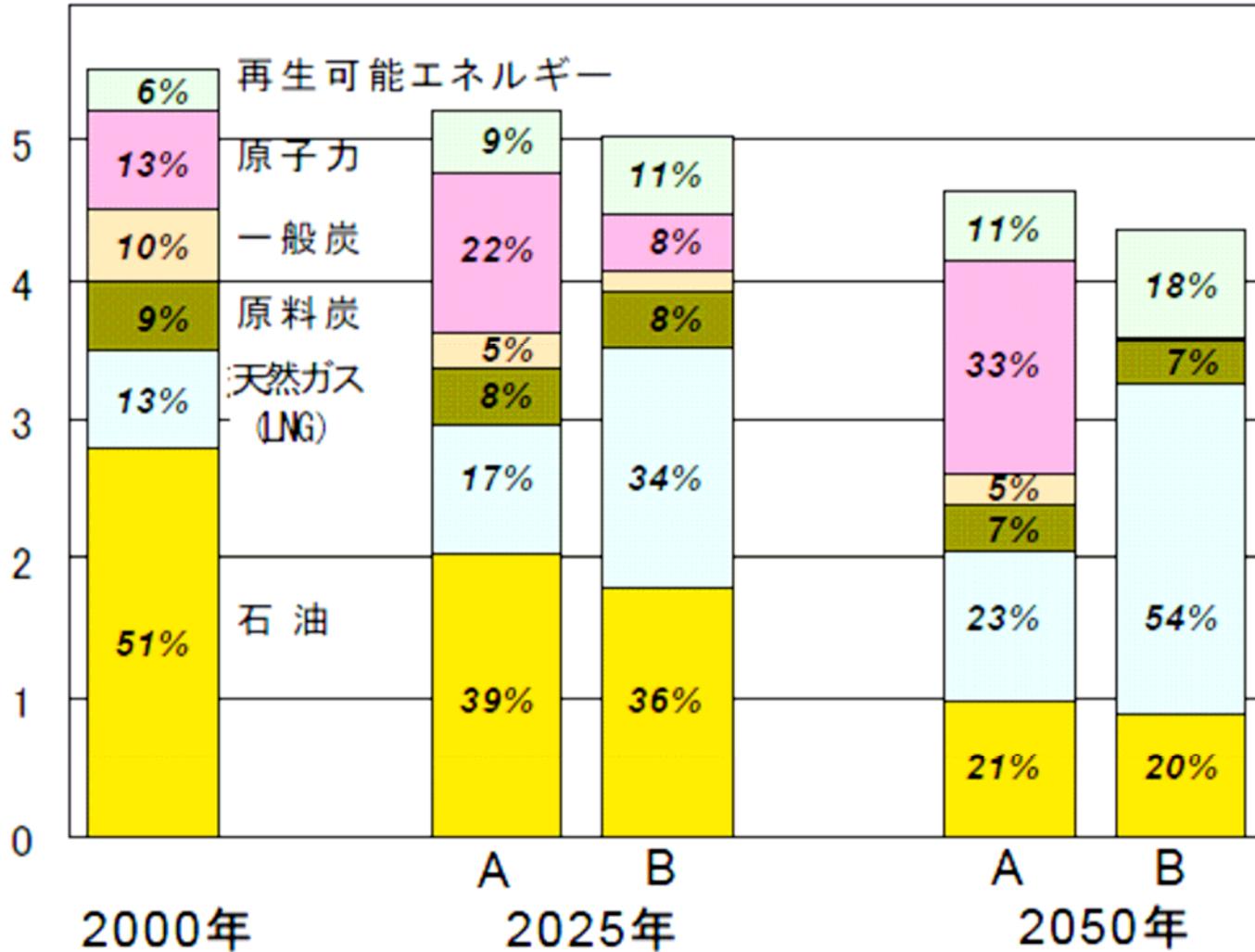
(10) 放射性廃棄物処分の進展

- わが国では、高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物の地層処分が開始されている。
- また、廃止措置で発生する放射性廃棄物を処分する活動も継続的に実施されている。
- 国際社会においては、国際的枠組み作りができたことにより、放射性廃棄物管理が困難な国においても、原子力利用が可能になっている。
- 先進国においては、マイナーアクチニド(MA)の分離・変換の実用化が進められている。

(11) 世界で活躍する日本の 原子力産業

- 世界での原子力発電所の建設プロジェクトでは、日本企業はグローバルアライアンスの下で活躍している。
- 日本企業は、プロジェクトの企画・推進、基盤となる技術の開発・改良、重要機器の製造などの活動を行っている。

億トン(石油換算)



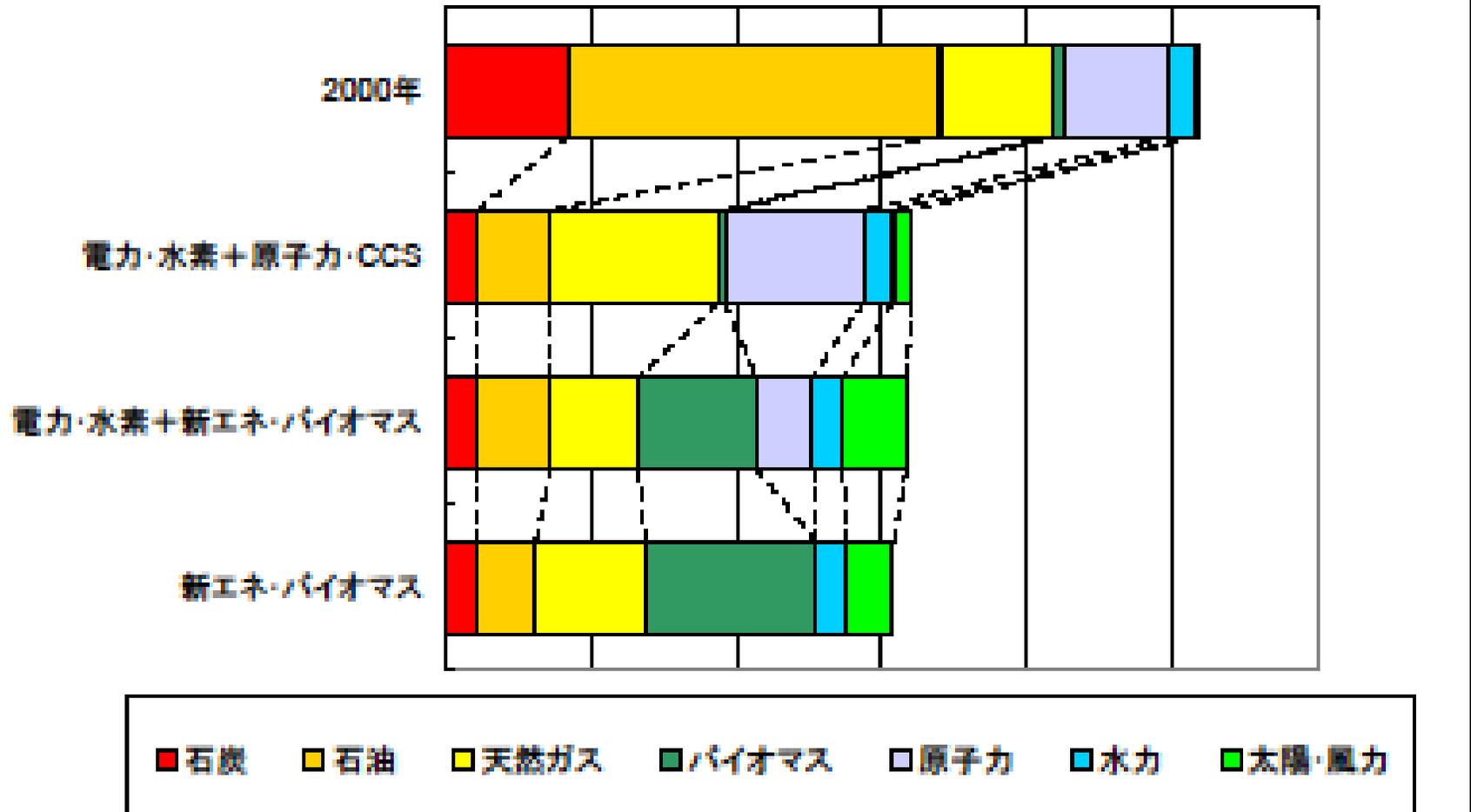
A:原子力拡大ケース
B:原子力廃止ケース、
CCSと再生可能エ
ネルギーの上限増加

一次エネルギー供給における原子力の役割

(「原子力ビジョン2050」、原子力産業会議、より)

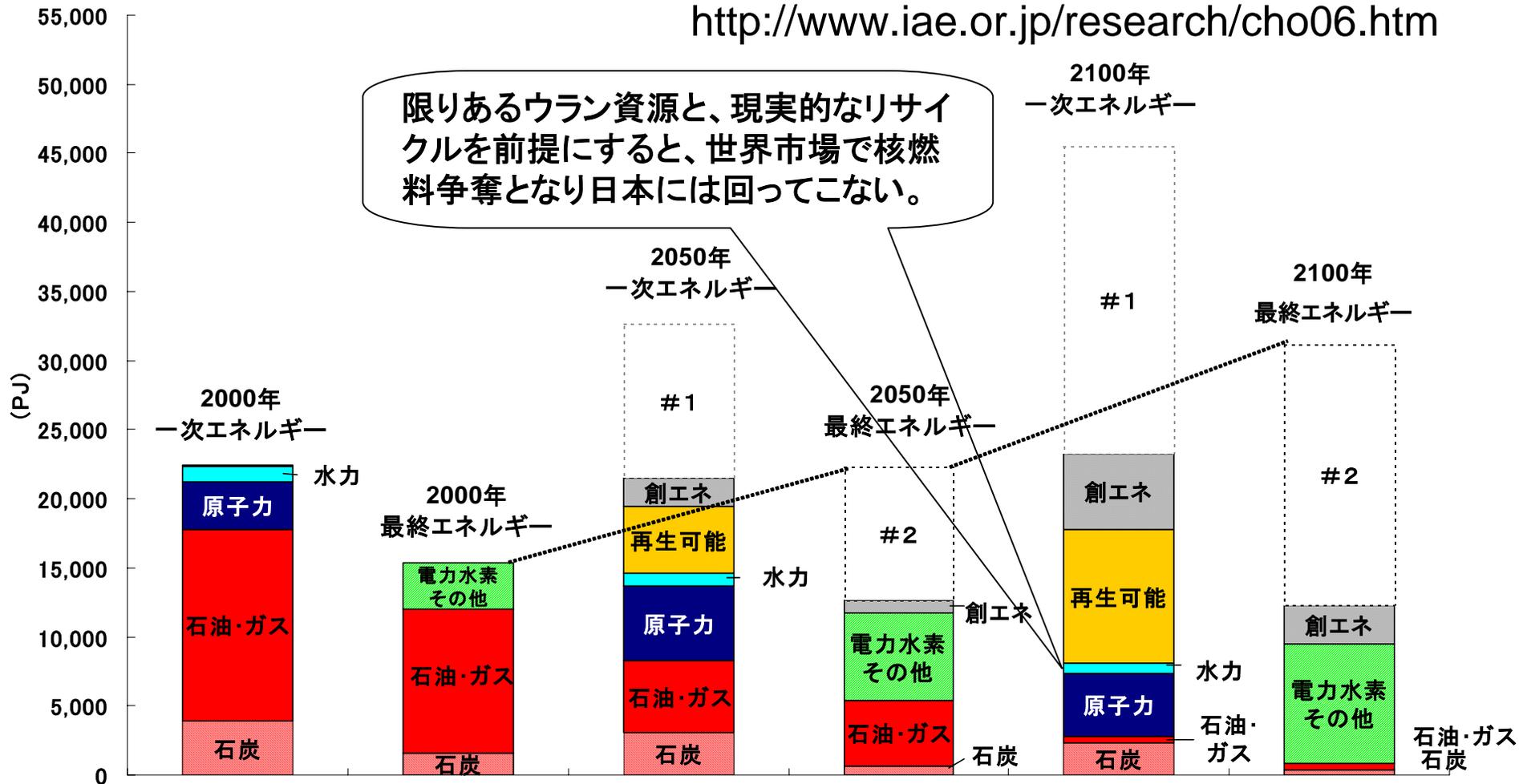
炭酸ガス排出量を1990年レベルから70%削減するには

(脱温暖化2050研究プロジェクト、2007より; <http://2050.nies.go.jp>)



超長期エネルギー技術ビジョン2100より

<http://www.iae.or.jp/research/cho06.htm>



技術目標達成時の日本のエネルギー需給構成の一例

※全ての技術的備えの結果としての一例(コスト最小化モデルによる試算)

※試算結果は暫定的なものであり、将来の前提および結果には不確実性を伴う。

※最終需要家によるエネルギーを「創エネ」と定義した。

※非化石エネルギーの一次エネルギー量については、化石燃料による転換効率を用いて便宜的に換算したもの。

#1 GDP比例での最終需要の伸びと同率で一次エネルギーが伸びたと仮定した場合の一次エネルギー供給量から、最終需要削減、転換効率向上等によって削減された供給量

#2 GDP比例での最終需要から、省エネルギー、機器効率向上等によって減少した需要

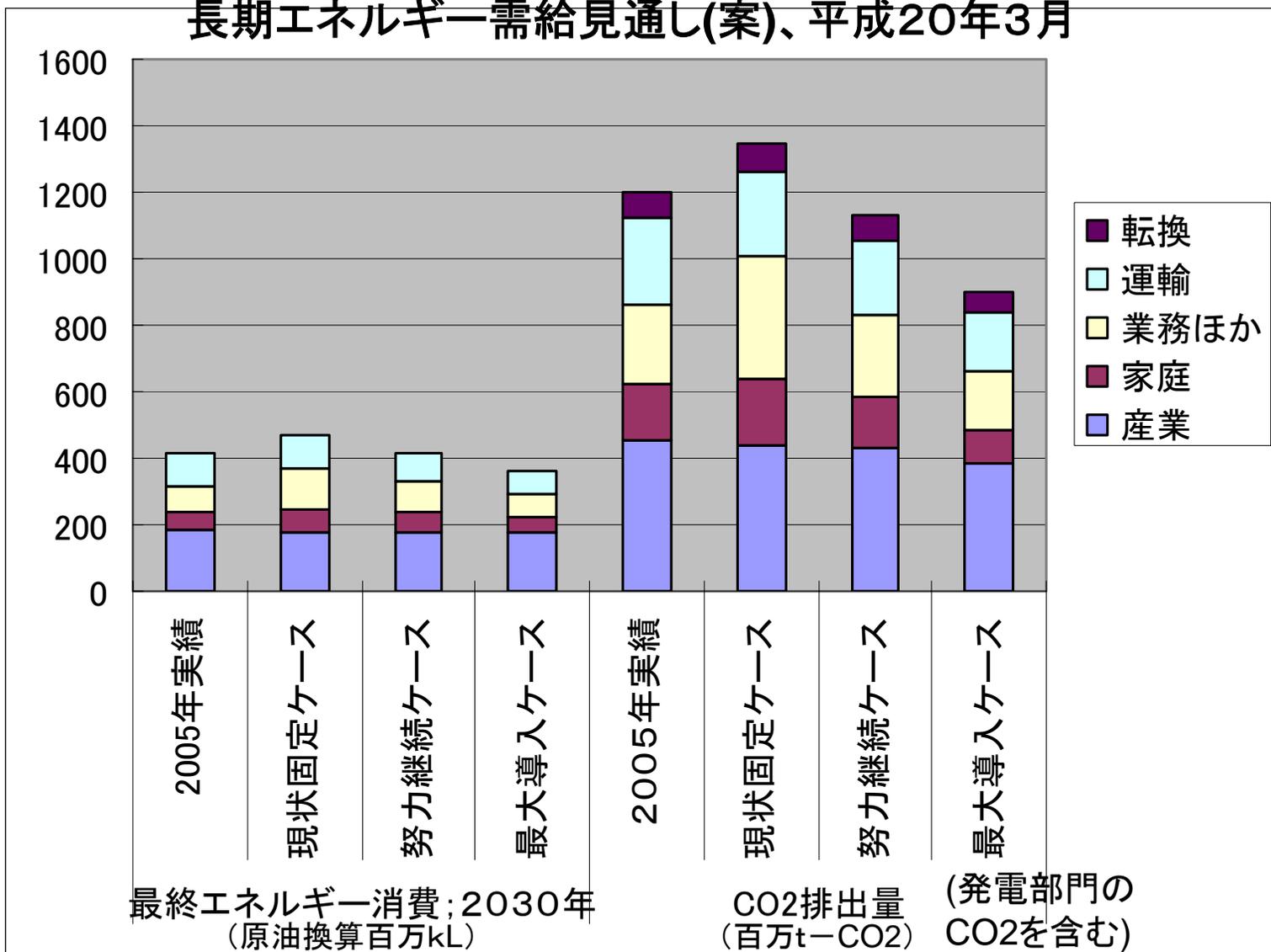
	CO2シェア × 排出率 (基準年比)	計
発電	0.421 × 0.39	0.164
鉄鋼	0.105 × 0.6	0.063
輸送	0.208 × 0.5	0.104
民生	0.113 × 0.7	0.079
その他産業	0.154 × 0.7	0.108
合計		0.518

表：日本のCO2半減シナリオ(2050)

茅先生、原産年次大会、2008、より

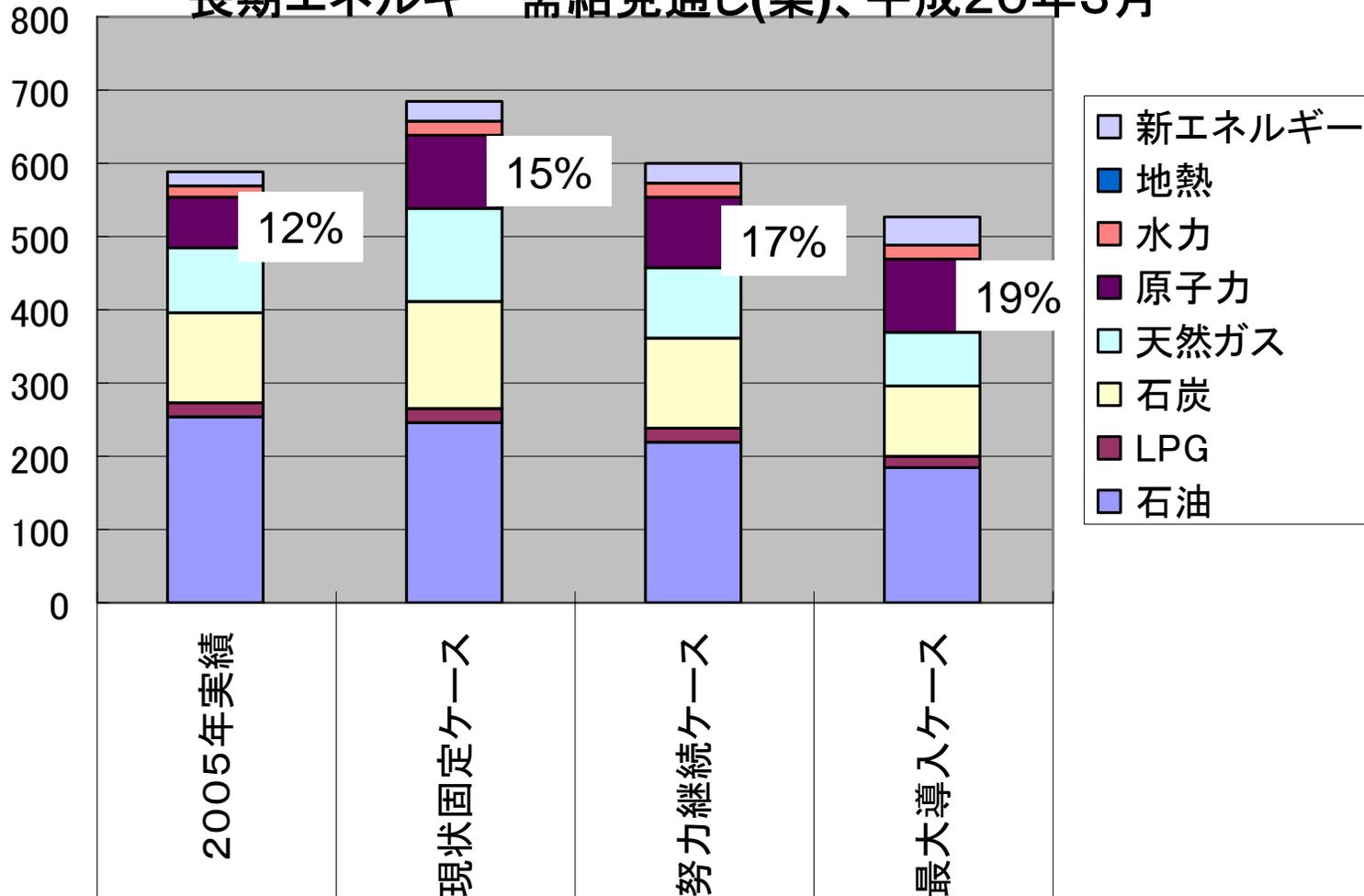
2030年の最終エネルギー消費とCO2排出量

長期エネルギー需給見通し(案)、平成20年3月



2030年の1次エネルギー供給の姿

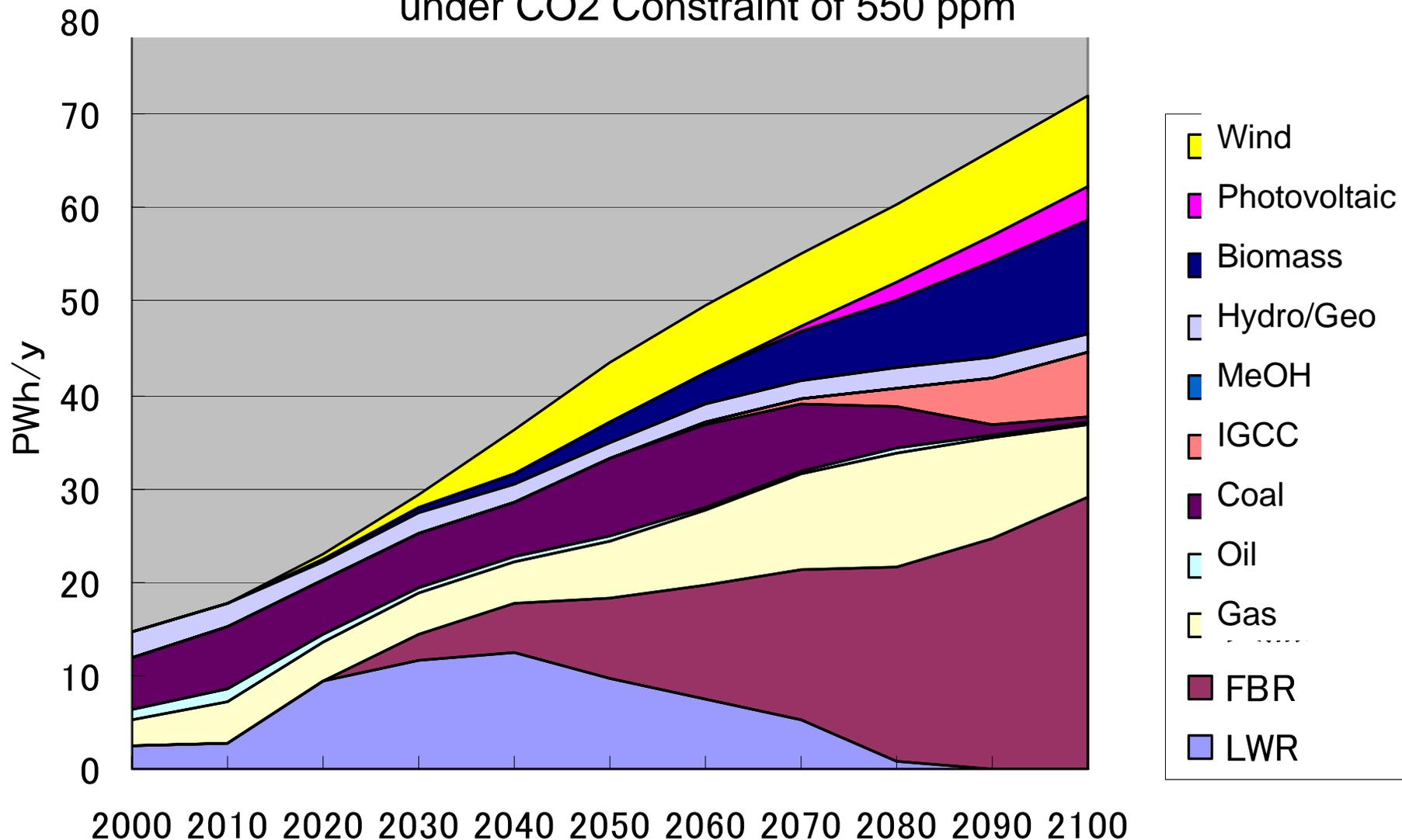
長期エネルギー需給見通し(案)、平成20年3月



一次エネルギー供給; 2030年; 原油換算百万kL

エネルギー源別世界の発電電力量

under CO2 Constraint of 550 ppm

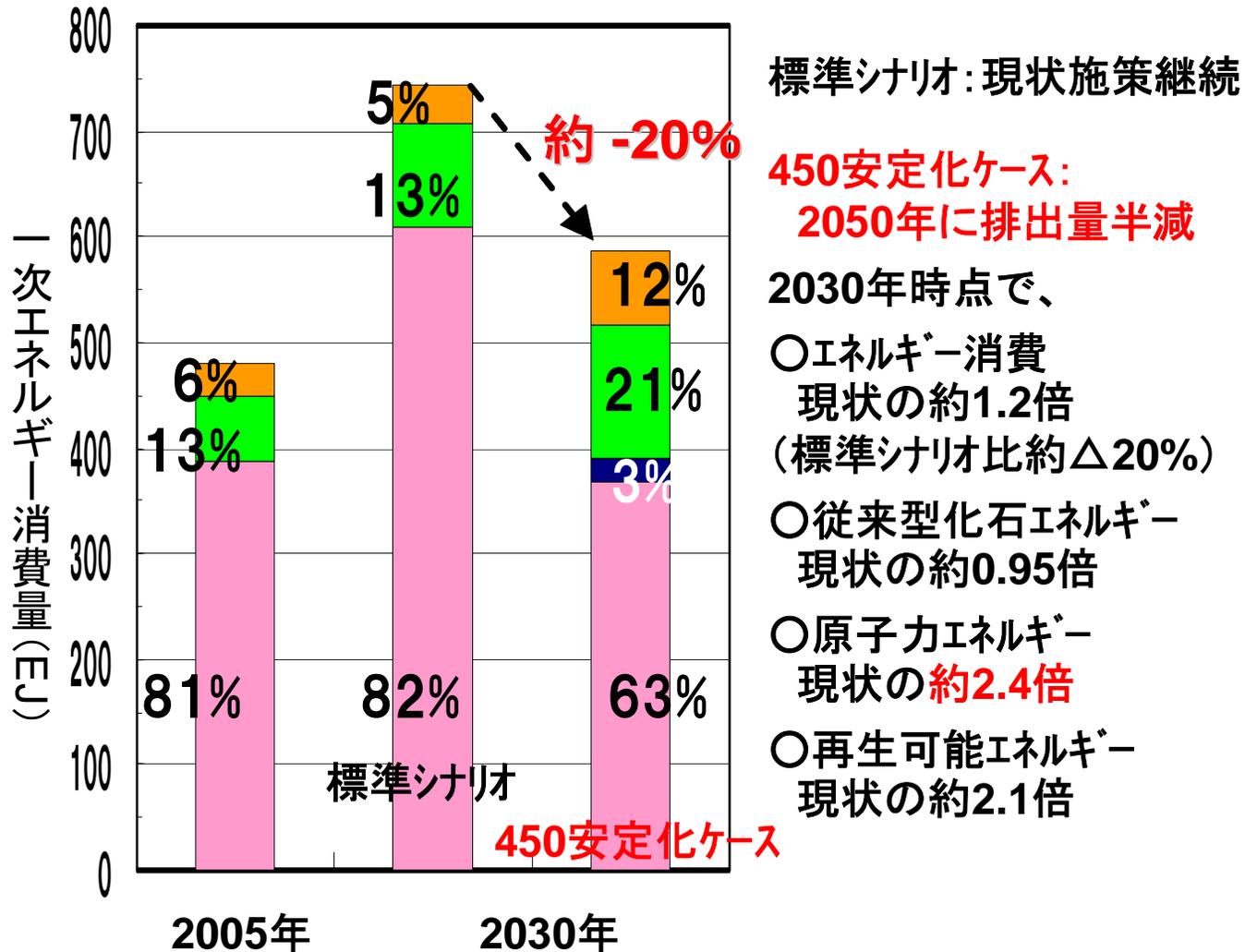


Year (*IAE2002評価結果: IAE-C0111)

WEO2007における450ppm安定化ケース 一次エネルギー消費の試算

■従来型化石エネルギー ■CCS化石エネルギー ■再生可能エネルギー ■原子力

出典: World Energy Outlook – 2007



WEO2007におけるシナリオと450ppm安定化ケース 炭酸ガス排出量の比較

(WEO2007, p209)

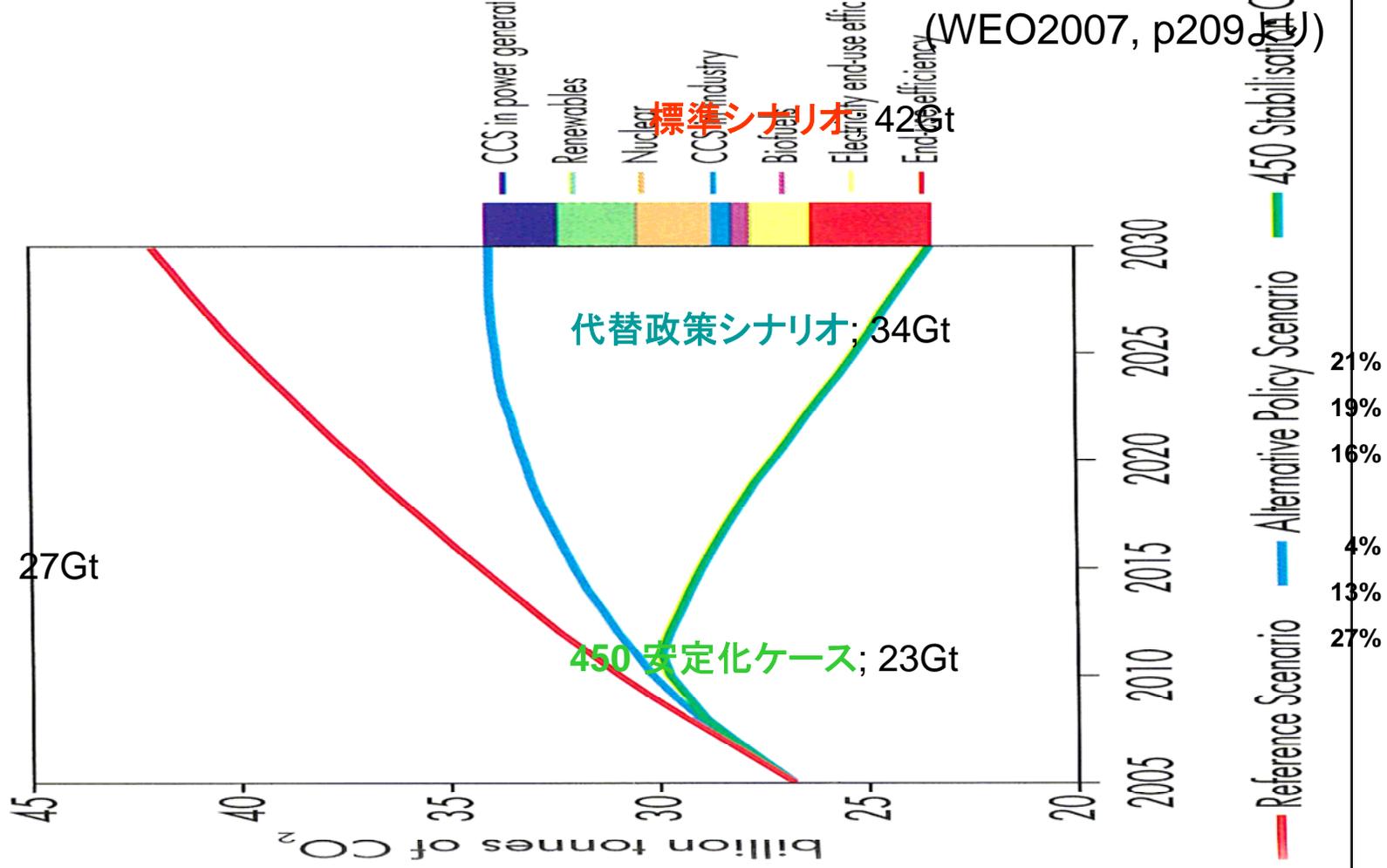
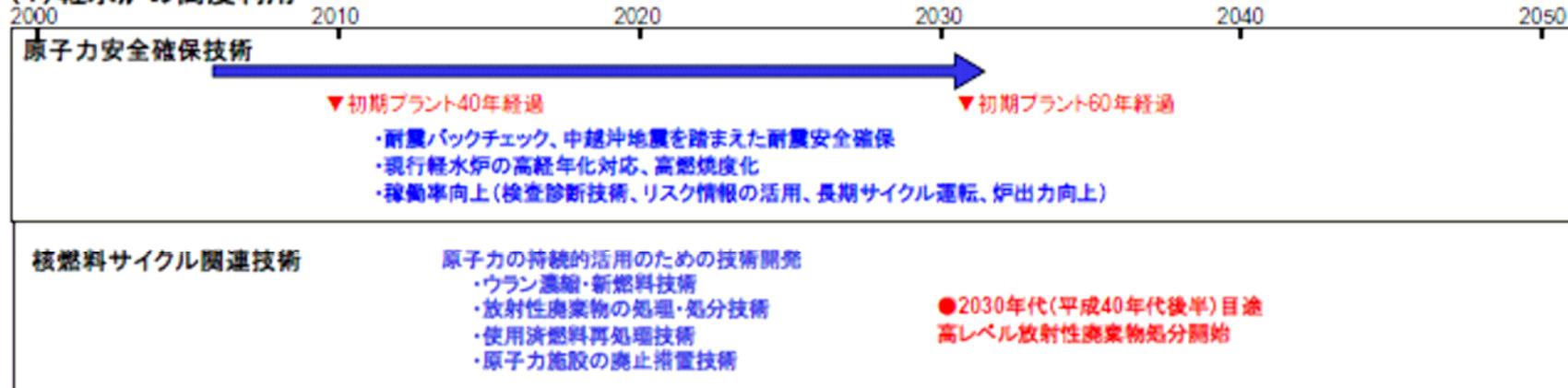


Figure 5.12: CO₂ Emissions in the 450 Stabilisation Case

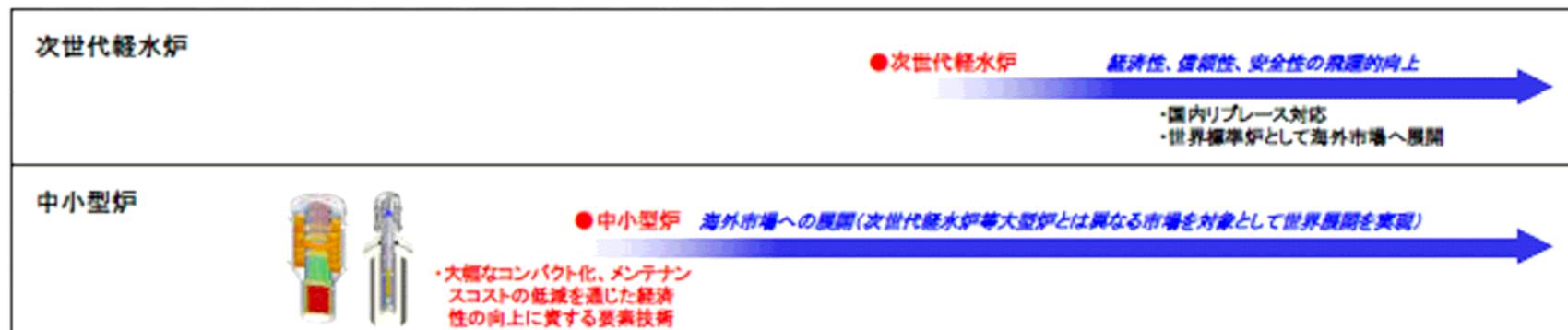
原子力の革新的技術開発ロードマップ、中間取りまとめの概要より(1)

(平成20年4月2日 原子力委員会)

(1) 軽水炉の高度利用



(2) 中期的観点から取り組む技術開発活動



原子力の革新的技術開発ロードマップ、中間取りまとめの概要より(2)

(平成20年4月2日 原子力委員会)

(3) 長期的観点から取り組む技術開発活動



2000

2010

2020

2030

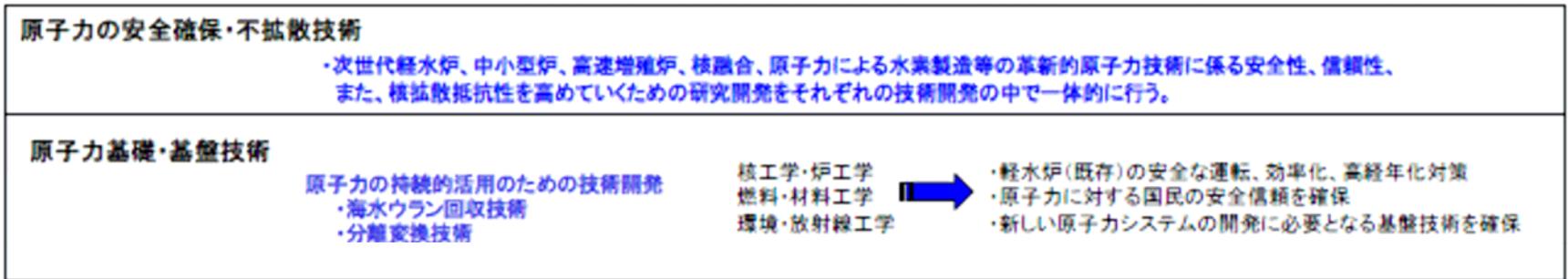
2040

2050

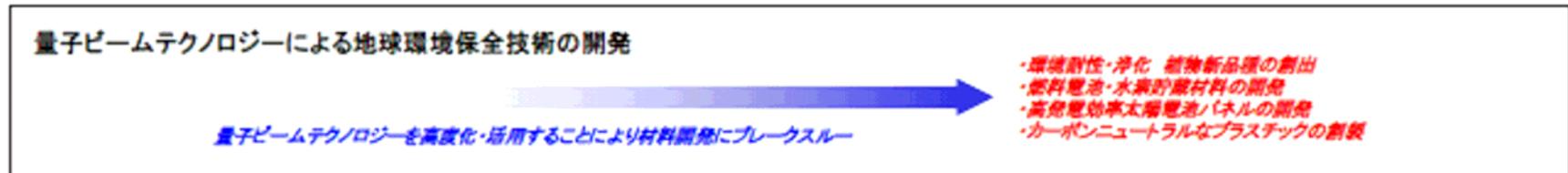
原子力の革新的技術開発ロードマップ、中間取りまとめの概要より(3)

(平成20年4月2日 原子力委員会)

(4) 革新的な原子力の技術開発を持続させるために必要な技術開発活動



(5) 革新的エネルギー技術のブレークスルーの実現に貢献する原子力科学技術



2000 2010 2020 2030 2040 2050

挑戦

- とりあえず市場はあるが、まず米国
- 経済性は外部性やLCAによる公平性も確保すべきだが、結局は投資とリターン、そのリスク
- 廃棄物を減じることは可能だが、人々の好みとFCの経済性のトレードオフ
- リサイクルは「ダーウィンの海」、長期的な取り組み必要；政府の関与、国際的な合意・理解
- 核拡散抵抗性には唯一の解はない、が世界で数千の原子炉のためには必須！
- 国際的な競争、競合関係の中での日本、その産業の鼎の軽重が問われている

2008年からの再挑戦

- 低炭素社会へのエース!
 - 安全?地震対応 「余裕」が正当化されたと見るのか?
 - 核不拡散? 核燃料サイクルを管理する国際的システムの開発
 - 廃棄物
- 次世代軽水炉開発の開始
- 世界市場拡大
- 国内外の制度の見直し、リセット
- 国内活動の生産性回復・向上と真の国際化

各国の原子力新設計画あるいは展望

国	計画あるいは展望	GWe/年	
インド	2022年までに30GWe 2052年までに275GWe	1.6 5.5	
パキスタン	2030年までに8GWeの新設	0.32	
中国	2020年までに40GWe 2050年までに250GWe(CIAE)	2 5	
ロシア	2030年までに30GWeの新設 2015年までに10基、12GWe	1から1.5 1.5	2020までに +22GWe
南ア	通常型軽水炉の新設決定、12基? 24基のPBMR(165MWe)		2030までに 27GWe
米国	2020年までに25基 2020年までに50GWe(NEI)	2 2.5	

次世代軽水炉のねらい

- **世界の原子力復興に呼応してわが国の産業競争力の維持向上**
 - － 原子炉開発能力の維持
 - － 日本が中核となった海外展開戦略の意思
 - － 国内産業のあり方を念頭に技術ならびに経営戦略の再構築
- **技術のブレークスルーに基づく競争力の強化**
 - － 運転サイクル長期化、高燃焼度化による利用効率の向上、使用済み燃料の低減
 - － 既設炉へのバックフィットも考慮
 - － 型式認定などの制度設計も視野に
- **標準化のあり方**
 - － 燃料、保守、免震などにおけるキーテクノロジーの同定
 - － 創造、応用を駆使して機能の合理化追及
 - － 初心に立ち返っての合理的な安全確保、競争力のある考え方の構築
- **サイクル、核不拡散**
 - － バックエンドを含む燃料経済の再確認
 - － 高速炉、対応する再処理との整合性
 - － 使用済み燃料の管理などの道筋
- **世界をリードする技術開発計画としてのアピール**

◆ 次世代軽水炉の本格開発に着手

原子力立国計画を踏まえたアクション

- 2006年度(平成18年度)から、約20年ぶりとなる次世代軽水炉開発に向けたフィージビリティ調査を実施。(平成19年度までの2年間) [IAEにて実施](#)
- 「次世代軽水炉FS研究会」(電気事業者、メーカー、国、有識者で構成)を設置し、世界標準を獲得し得る次世代軽水炉のコンセプト等について検討。 [IAEにて実施](#)
- これまでのフィージビリティ調査の結果を踏まえ、2008年度(平成20年度)からの本格開発着手に向けて関係者間で合意。

今後の計画

- ✓ 2008年度(平成20年度)から、「次世代軽水炉技術開発費補助事業」を開始(平成20年度予算概算要求で 12.5億円)
- ✓ 技術開発が円滑かつ着実に実施されるよう、官民一体となった体制を整備しつつ、世界標準を目指した規格・基準の整備や規制高度化等、技術開発と統合的な戦略を構築する。

次世代軽水炉開発のスキーム

- **世界標準を獲得し得る炉の開発**
 - BWR、PWR各1炉型
 - 170～180万kW級（標準化を阻害しない範囲で80～100万kW級も視野）
- **メーカーが主体、国・電気事業者と一体となって技術開発を推進**
 - 国内市場のみならず、海外市場も睨む
- **総開発費600億円程度**
 - 1/2国庫補助、特に革新性・基盤性の高い一部の技術開発は全額国庫補助
- **平成20年度から8年間で基本設計までを完了**
 - 長期を要する材料試験等、一部の技術開発はその後も継続
 - 平成22年度に評価を実施し開発計画への反映・見直しを判断
- **開発と規格基準類整備・規制高度化との一体的な推進**
- **国際展開の戦略的な構築**

次世代軽水炉の開発項目

—6つのコアコンセプト—

① 世界初の濃縮度5%超燃料を用いた原子炉系の開発による

— 使用済燃料の大幅削減と世界最高の稼働率実現

- 使用済燃料の発生量: 約3~4割削減
- 稼働率: 現行の70~80%台から97%に向上

② 免震技術の採用による、立地条件によらない標準化プラントの実現

- 国内外の立地自由度の大幅拡大
- 地震力減少・標準化設計による建設費低減

⑤ パンプ系、アクティブ系の最適組合せによる、世界最高水準の安全性・経済性の同時実現

- 安全性は現行最新炉のABWR・APWRと同等以上
- 建設費・保全作業量を約半減

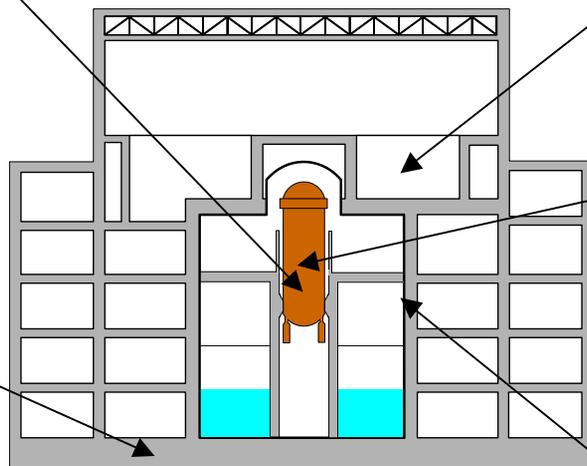
③ プラント寿命80年とメンテナンス時の被ばく線量の大幅低減を目指した、新材料と水化学

の融合

- プラント寿命を80年に延伸
- 被ばく線量を現状の1割以下に低減

④ 斬新な建設技術の採用による、建設工期の大幅短縮

- 建設現場作業の大幅削減
- 建設工期: 現行約50ヶ月から約30ヶ月に短縮



※図はABWRイメージ

⑥ 稼働率と安全性を同時に向上させる、世界最先端のプラントデジタル化技術

次世代軽水炉の技術開発課題

<p>①濃縮度5%超燃料を用いた原子炉系の開発</p>	<p>①-1 濃縮度5wt%超燃料の臨界試験 ①-2 PWR超高燃焼度化燃料開発(Zr系,新材料) ①-3 BWR超高燃焼度燃料材の開発(新材料(ハイドライドフリー材),改良材) ①-4 BWR水素吸収抑制被覆管の開発 ①-5 スペクトルシフト燃料</p>
<p>②免震技術の開発</p>	<p>② 免震装置の実証</p>
<p>③新材料と水化学技術の開発</p>	<p>③-1 蒸気発生器伝熱管材料の開発 ③-2 炉内構造部材開発 ③-3 材料・水化学技術の高度化</p>
<p>④斬新な建設技術の開発</p>	<p>④ 斬新な建設工法(SC構造)の開発</p>
<p>⑤先進安全システム開発</p>	<p>⑤ 先進安全システム開発</p>
<p>⑥プラントデジタル化技術の開発</p>	<p>⑥ プラントデジタル化技術の開発</p>

次世代軽水炉開発の基盤整備

技術開発(ハード)と並行して、次世代軽水炉に係る基盤の整備(ソフト)を図る。

- 1) 円滑な開発導入に必要な規格基準の整備
- 2) 国際標準炉とするための方策の分析・整理
- 3) 産業、人材等の推進基盤の整備

次世代軽水炉の開発体制

- ・ エネルギー総合工学研究所が中核機関として事業を実施する。
- ・ エネルギー総合研究所の次世代軽水炉開発事業に、東芝、日立GEニュークリア・エナジー、三菱重工の原子炉メーカー3社が参加し、協働体制を構築して技術開発を実施する。

本年3月31日、33年間に亘り原子力発電の信頼性、安全性向上に向け事業を実施してきた(財)原子力発電技術機構(NUPEC)は、解散。

安全解析事業

安全解析コード(IMPACT)を活用して、原子力発電に係る種々の事象の評価分析を行います。

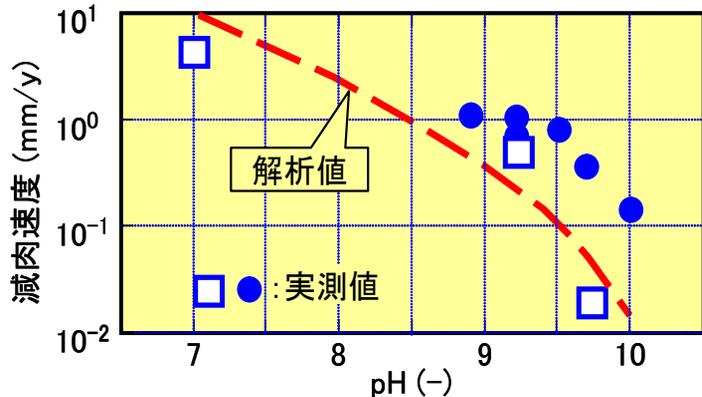


図2 流動加速腐食による配管減肉の解析

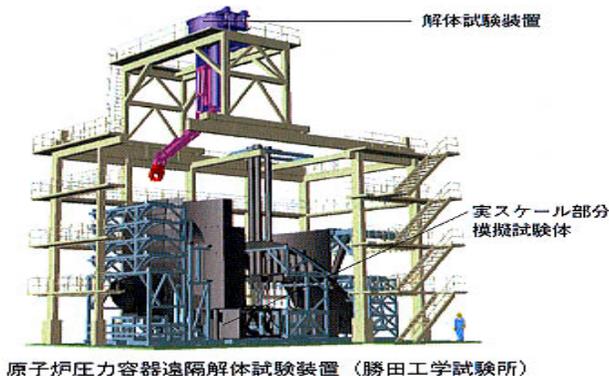
耐震事業

多度津工学試験所の大型高性能振動台を用いた実証試験等で得られた貴重なデータは、データベースとして整備されています。



廃止措置事業

「廃止措置技術ハンドブック」「軽水炉廃止措置実施に向けたロードマップ」により、廃止措置に係る検討を支援します。



原子炉圧力容器遠隔解体試験装置 (勝田工学試験所)

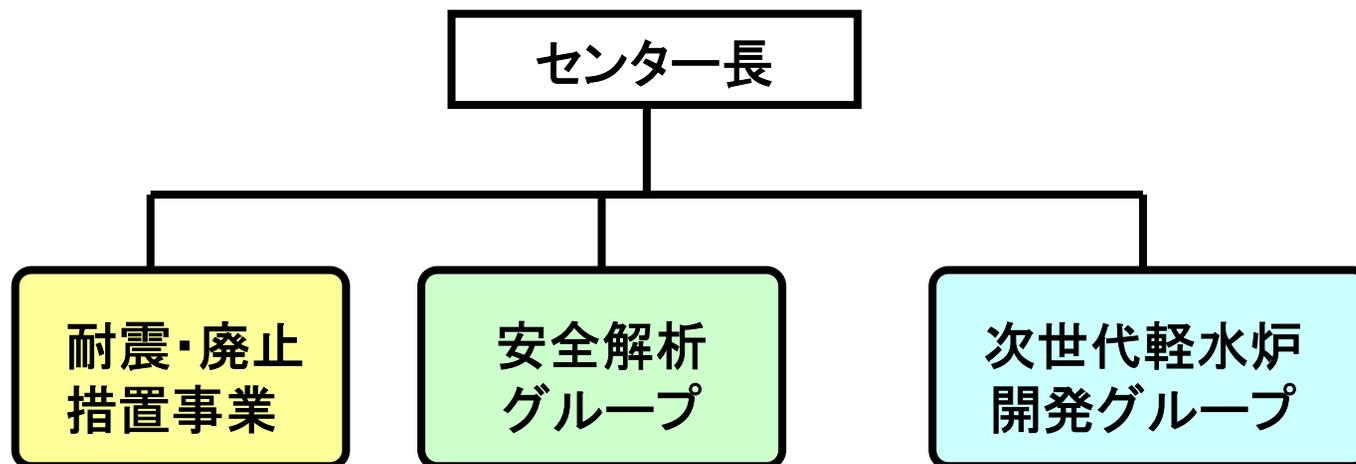
NUPECが実施してきた安全解析、耐震、廃止措置の事業は、エネ総研が継承します。

エネ総研は、20年4月から、同研究所内に「原子力工学センター」を設置し、

1. 原子力発電技術機構からの継承事業とともに、
2. 中核機関として次世代軽水炉開発事業を推進

財団法人エネルギー総合工学研究所 原子力工学センター

[略称：NUPEC(原子力工学センター)]



原子炉開発の経緯



Gen I 初期の原型炉	Gen II 商用原子炉	Gen III 改良型軽水炉	Gen III + 次世代軽水炉	Gen IV 新型炉
-----------------	-----------------	-------------------	---------------------	---------------

Shippingport
(米, P10万kW)
Dresden
(米、B21万kW)
Magnox (英)
東海ガス炉
(16.6万kW)

軽水炉
・ BWR
・ PWR
重水炉
CANDU
ロシア型炉
・
VVER/RBMK

軽水炉
・ ABWR
・ APWR
・ ESBWR
・ AP-1000
・ EPR
重水炉
CANDU

経済性
安全性
運転性
の大幅な
向上

ガス冷却炉
高速炉
革新型軽水
炉

閉鎖対象

現在の原子力発電の主力

新規建設の原子炉

わが国が開発に着手

GIFの国際協力枠組で実施中

第3世代原子炉の特徴

	ABWR	ESBWR	APWR	AP-1000	EPR
企業	東芝、日立、 GE	GE－日立	三菱重工 WH	東芝－WH	Areva
NRC	DC取得済	DC申請中	DC申請中	DC取得済	DC申請中
開発 状況	国内4基運転中 (柏崎刈羽6・7、 浜岡5、志賀2) 大間 審査中 台湾2基建設中		敦賀3・4 審査中		フィンランド ¹ 基建設 中、仏 1 基計画 中
出力	135.6万kWe	155	153.8	111.7	160
特徴		①自然循環系、 静的安全系 ②単純化・大 型化で経済性 向上		①静的安全系 ②安全系, 林 ¹ ト設備を簡素 化	①シ ¹ アクシ ¹ ント対 策 (コアキャッチャ、二重 格納容器等) ②安全系は4トリ ン構成で建物も区分

(注) DC : 標準設計認証

(出所) NRC欄の状況は、海電調「海外電力」(08年02月)による

Generations of Nuclear Energy

Generation I

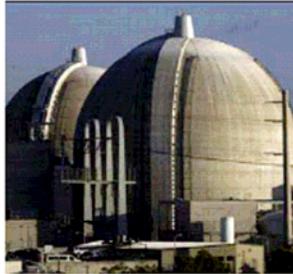
Early Prototypes



- Shippingport
- Dresden
- Magnox

Generation II

Commercial Power



- PWRs
- BWRs
- CANDU

Generation III

Advanced LWRs



- CANDU 6
- System 80+
- AP600

Generation III+

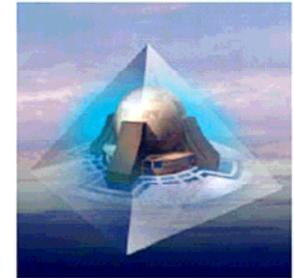
Evolutionary Designs



- ABWR
- ACR1000
- AP1000
- APWR
- EPR
- ESBWR

Generation IV

Revolutionary Designs



- Safe
- Sustainable
- Economical
- Proliferation Resistant and Physically Secure

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030

Gen I

Gen II

Gen III

Gen III+

Gen IV

Generation IV Goals

Sustainability

1. Generate energy sustainably, and promote long-term availability of nuclear fuel
2. Minimize nuclear waste and reduce the long term stewardship burden

Safety & Reliability

3. Excel in safety and reliability
4. Have a very low likelihood and degree of reactor core damage
5. Eliminate the need for offsite emergency response

Economics

6. Have a life cycle cost advantage over other energy sources
7. Have a level of financial risk comparable to other energy projects

Proliferation Resistance & Physical Protection

8. Be a very unattractive route for diversion or theft of weapons-usable materials, and provide increased physical protection against acts of terrorism

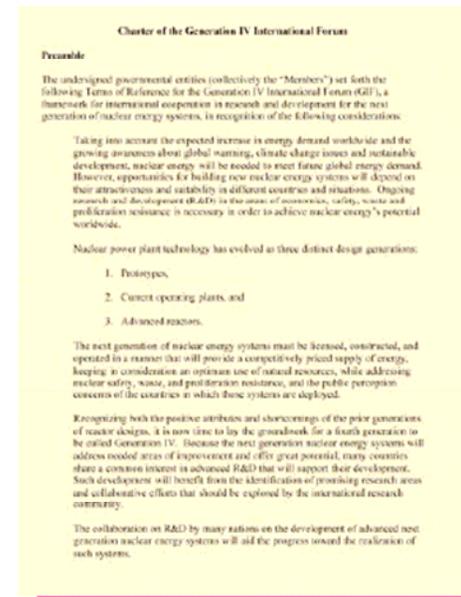
Generation IV International Forum

Chartered in July 2001

- Set out Vision, Goals and Objectives
- Nine charter members
- Created a virtual organization
 - Government leaders in a Policy Group
 - Technical advisors in an Experts Group
- Makes decisions by consensus
- Members bear their own costs, and participate in the systems and R&D that they choose
- GIF works with other organizations, especially IAEA and OECD/NEA to draw expertise
- Shares information openly where possible

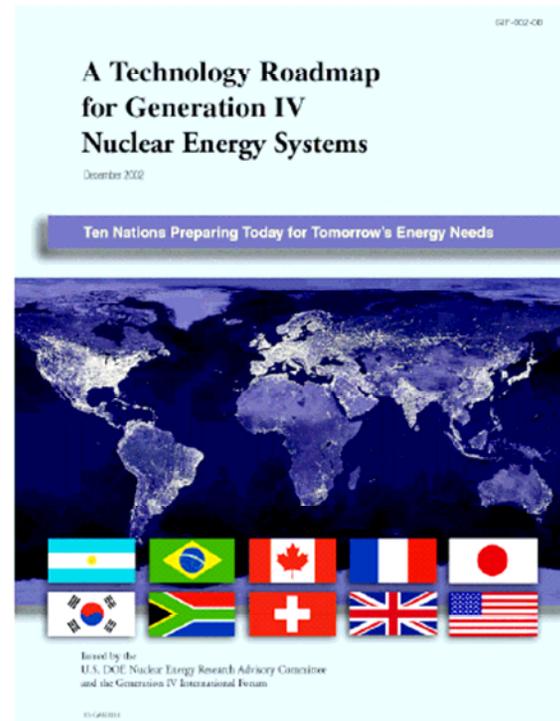
Founding Members now joined by:

- Switzerland (2002), Euratom (2003), China and Russia (2006)



The Technology Roadmap

- Two-year effort by 100 international experts finding the most promising nuclear systems
- **Six systems were selected:**
 - Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)
 - Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)
 - Molten Salt Reactor (MSR)
 - Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)
 - Supercritical-Water Reactor (SCWR)
 - Very-High-Temperature Reactor (VHTR)
- Timelines and research needs were developed for the needed technology



Overview of the Generation IV Systems

<i>System</i>	<i>Neutron Spectrum</i>	<i>Fuel Cycle</i>	<i>Size (MWe)</i>	<i>Applications</i>	<i>R&D Needed</i>
<i>Very-High-Temperature Reactor (VHTR)</i>	Thermal	Open	250	Electricity, Hydrogen, Process Heat	Fuels, Materials, H ₂ production
<i>Supercritical-Water Reactor (SCWR)</i>	Thermal, Fast	Open, Closed	1500	Electricity	Materials, Safety
<i>Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)</i>	Fast	Closed	200-1200	Electricity, Hydrogen, Actinide Management	Fuels, Materials, Safety
<i>Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)</i>	Fast	Closed	50-150 300-600 1200	Electricity, Hydrogen Production	Fuels, Materials
<i>Sodium Cooled Fast Reactor (SFR)</i>	Fast	Closed	300-1500	Electricity, Actinide Management	Advanced recycle options, Fuels
<i>Molten Salt Reactor (MSR)</i>	Epithermal	Closed	1000	Electricity, Hydrogen Production, Actinide Management	Fuel treatment, Materials, Safety, Reliability

System Partners

							
VHTR	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
GFR		◆	◆	◆		◆	
SFR		◆	◆	◆	◆		◆
SCWR	◆	◆		◆			
LFR		◆		◆			
MSR		◆	◆				

Partners:

NRCan

JRC

CEA

JAEA,
ANRE

MEST
KOSFEF

PSI

DOE

NRCan – Department of Natural Resources (CA)

JRC – Joint Research Centre (EU)

CEA – Commissariat à l'Énergie Atomique (FR)

JAEA – Japan Atomic Energy Agency (JP)

ANRE – Agency for Natural Resources and Energy (JP)

MEST – Ministry of Education, Science and Technology (KR)

KOSFEF – Korean Science and Engineering Foundation (KR)

PSI – Paul Scherrer Institute (CH)

DOE – Department of Energy (US)

VHTR – Very-High-Temperature Reactor

GFR – Gas-Cooled Fast Reactor

SFR – Sodium-Cooled Fast Reactor

SCWR – Supercritical Water-Cooled Reactor

LFR – Lead-Cooled Fast Reactor

MSR – Molten Salt Reactor

Aug 2007

Working Toward the Future

The GIF joined together to help assure a sustainable energy future

- Underscored by the advance of global climate change
- Based on advanced nuclear energy systems that are sustainable, safe, economical, proliferation resistant and physically secure
- Accelerated by the collaboration of the GIF members, industry, academia and non-member nations and institutions



終わりに

- IPCC報告を額面どおり受け入れるとすると、
- IEAの「世界エネルギー展望」の標準、代替政策シナリオでは間尺にあわない、
- 漸進的な対策の積み上げでは間に合わない。
- HPやEVなどによる更なる電力利用と、多目的利用をも目指す原子力の最大限の導入は温暖化対策の決め手のひとつ
- 「技術と社会」という課題に、謙虚に立ち向かうべし