



International Institute for
Applied Systems Analysis
www.iiasa.ac.at



世界のエネルギー展望 と原子力の役割

ネボーシャ・ナキシエノビッチ

国際応用システム分析研究所 (IIASA)

副所長

ウィーン工科大学

エネルギー経済学 名誉教授

日本原子力産業協会(東京) - 2016年4月12日



IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis



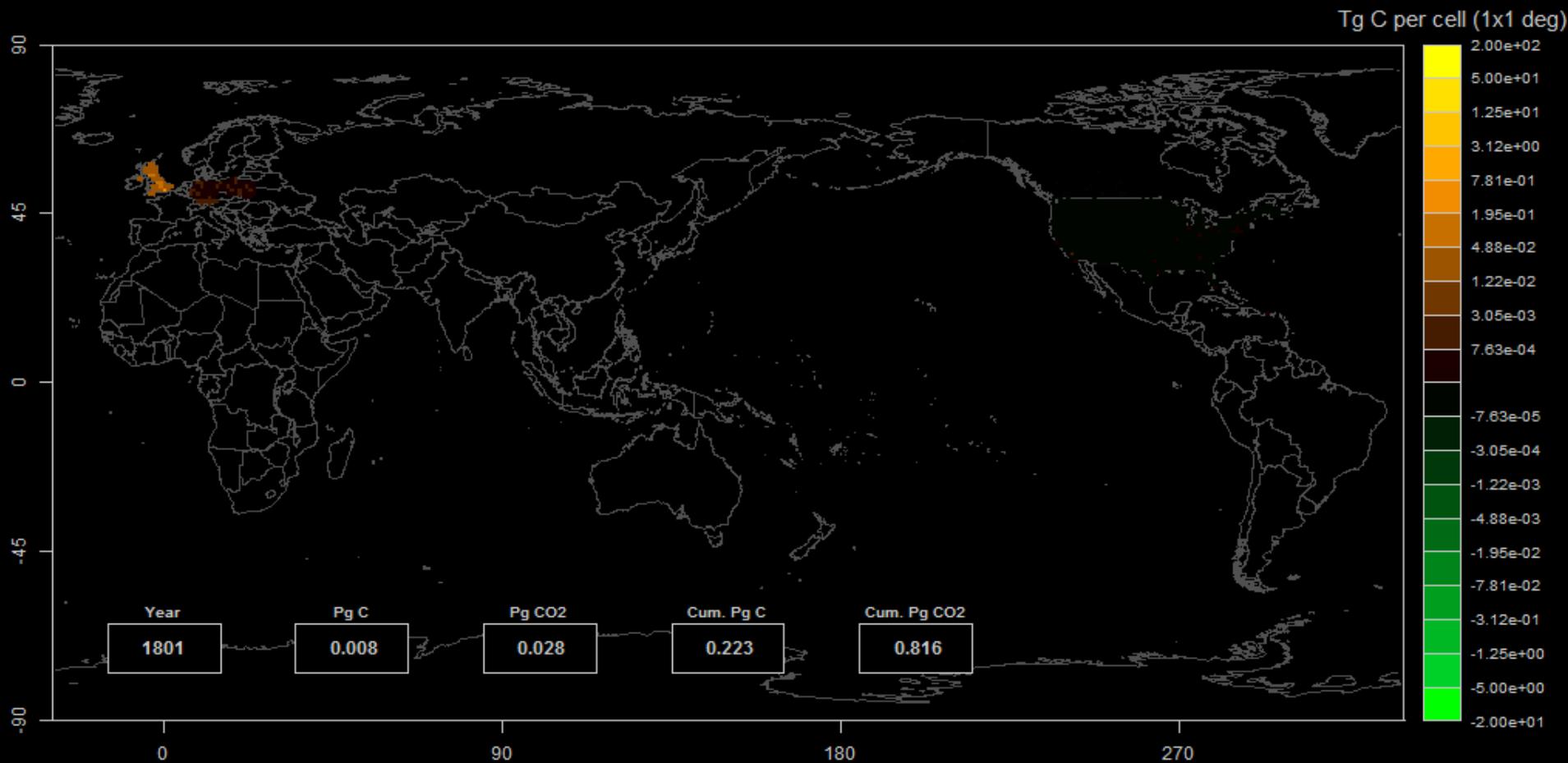
- 国際的かつ独立した学際的科学
- グローバルな課題に関する研究
およびビッグデータ
- 解決策および政策中心の統合シ
ステム分析



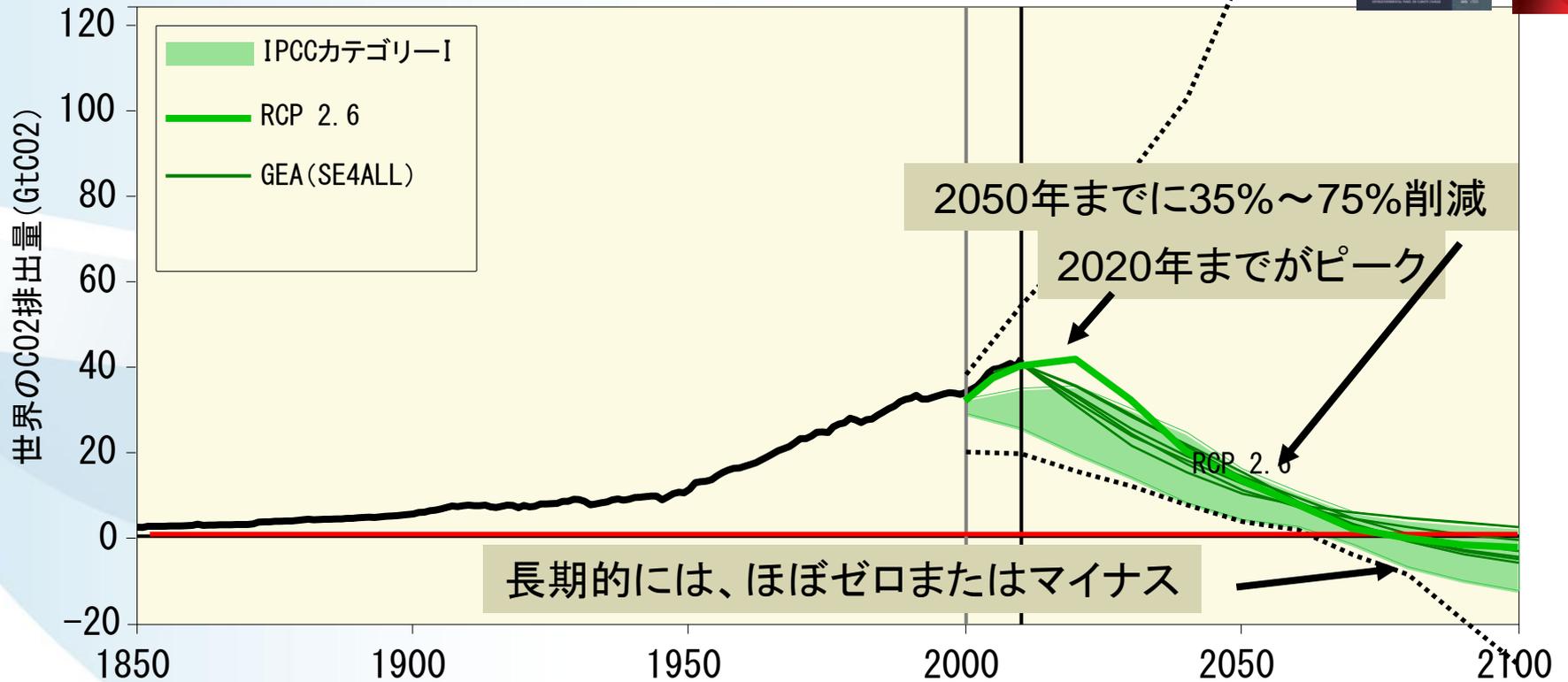
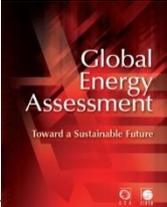
地球の平均気温の上昇



世界のCO₂排出量

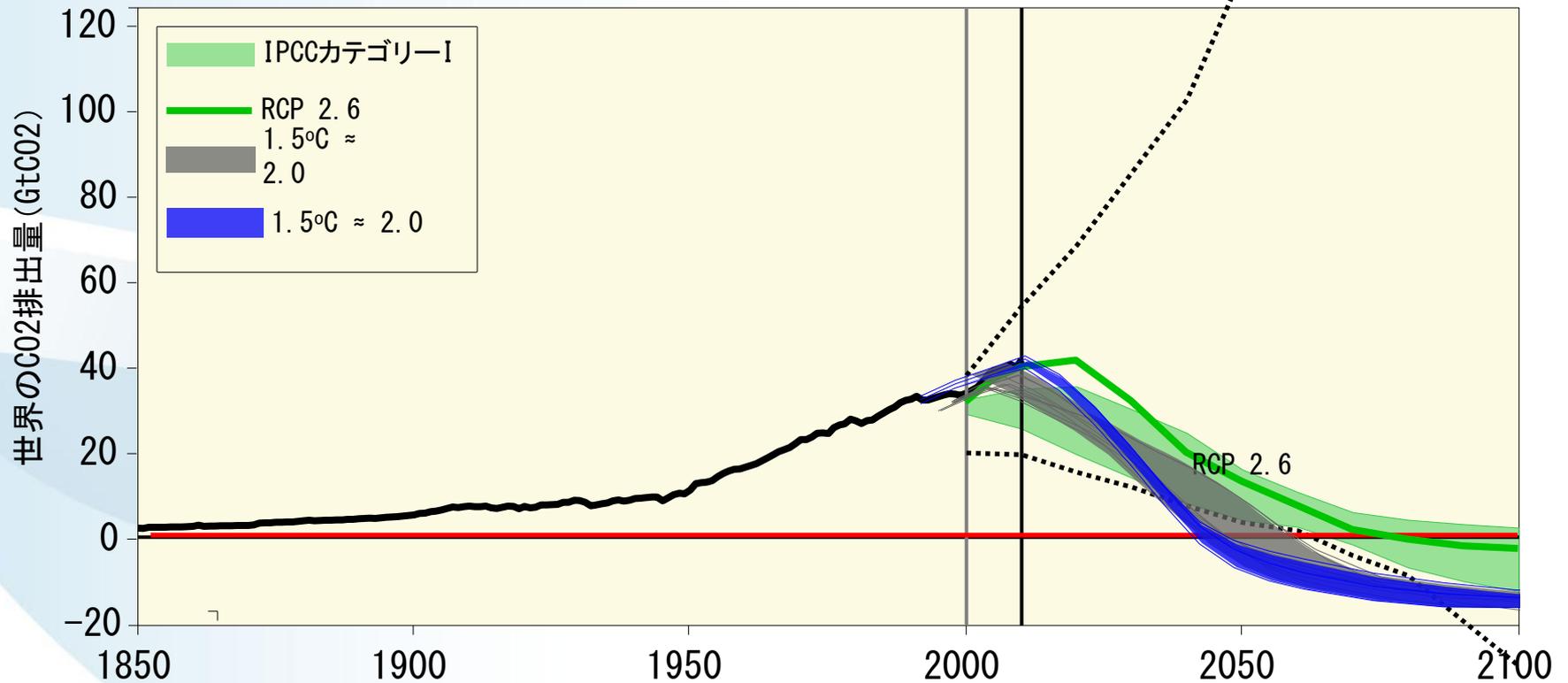


世界のCO₂排出量



世界のCO₂排出量

自然気候変動



主要なエネルギーをめぐる課題



エネルギー
へのアクセス



気候変動

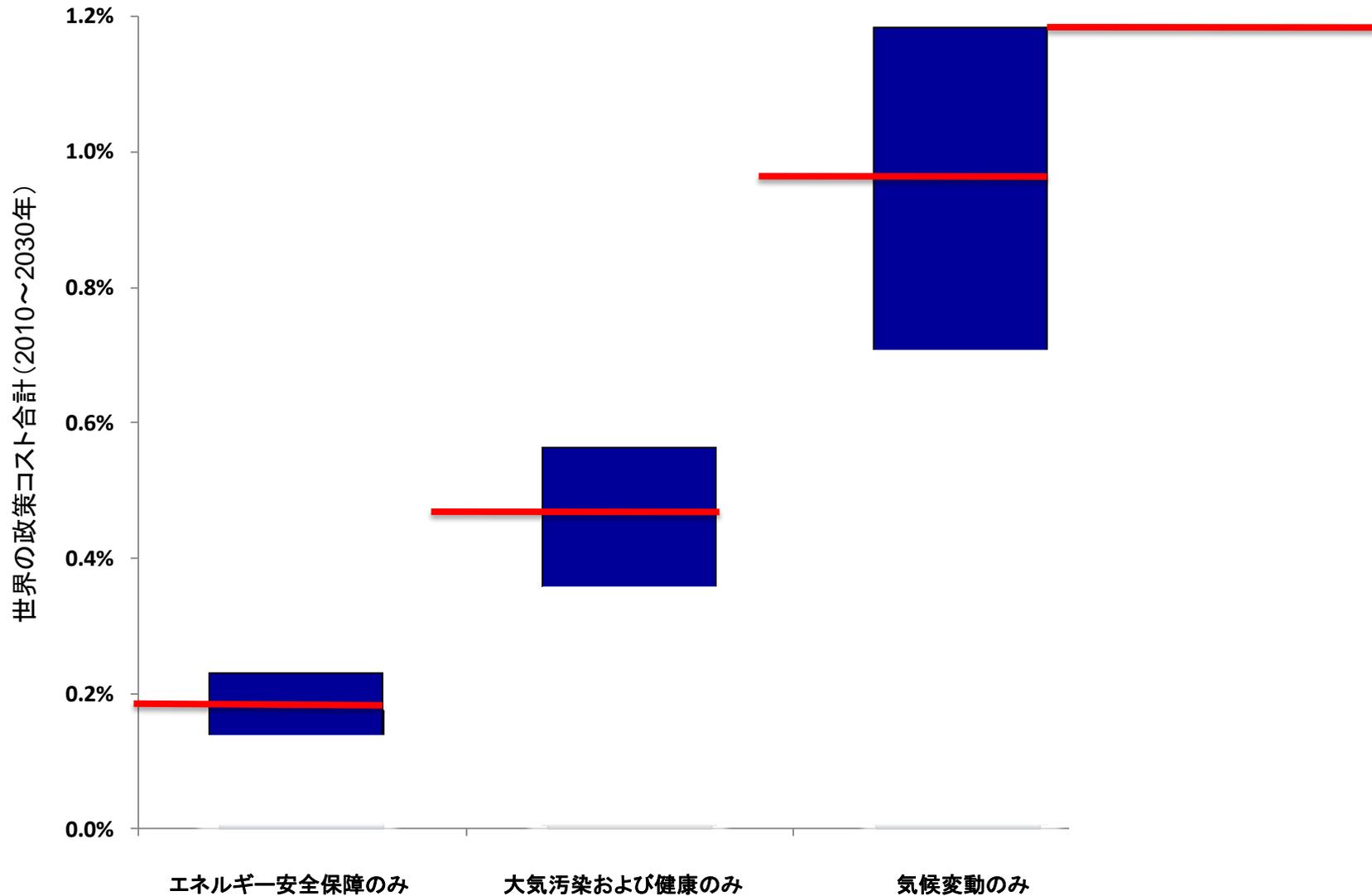


エネルギー
安全保障



大気汚染
健康影響

統合政策の複合的な利点





持続可能な開発目標

| | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| 1 貧困をなくそう | 2 飢餓をゼロに | 3 すべての人に健康と福祉を | 4 質の高い教育をみんなに | 5 ジェンダー平等を実現しよう | 6 安全な水とトイレを世界中に |
| 7 エネルギーをみんなにそしてクリーンに | 8 働きがいも経済成長も | 9 産業と技術革新の基盤をつくろう | 10 人や国の不平等をなくそう | 11 住み続けられるまちづくりを | 12 つくる責任つかう責任 |
| 13 気候変動に具体的な対策を | 14 海の豊かさを守ろう | 15 陸の豊かさを守ろう | 16 平和と公正をすべての人に | 17 パートナーシップで目標を達成しよう | |

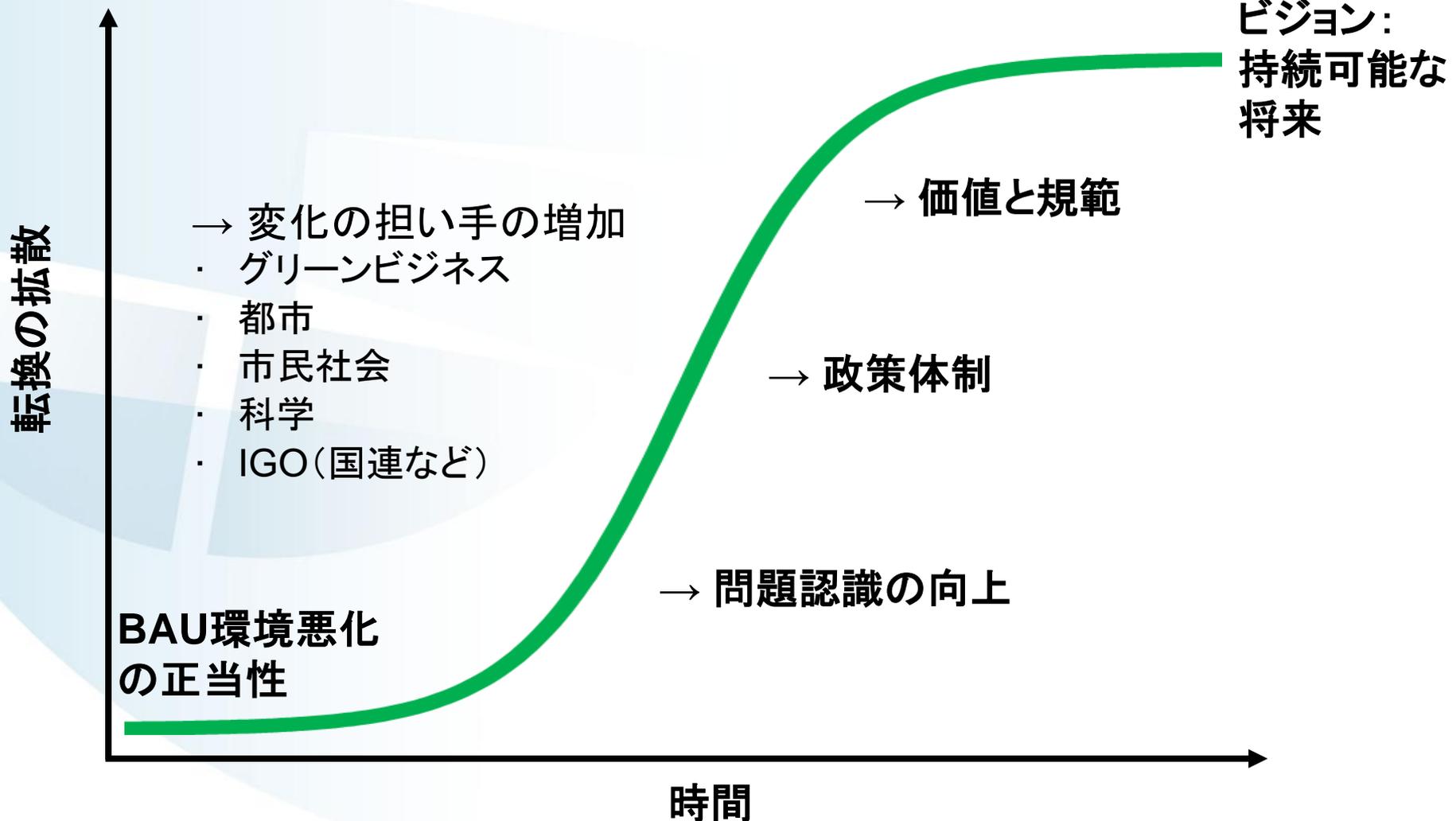
2050年の世界（TWI2050）

- ➡ 安全かつ機能する地球のなかでいかにして世界規模の発展を成し遂げるか
- ➡ SDGの相互作用における「安全な地球」：持続可能性に関する説明および統合モデル
- ➡ 既存の文献（SSP1、GEA、DDPPなど）に基づく持続可能な開発の道筋
- ➡ 「安全な地球」および持続可能な将来を実現する方法への転換の複合的な利益と代償

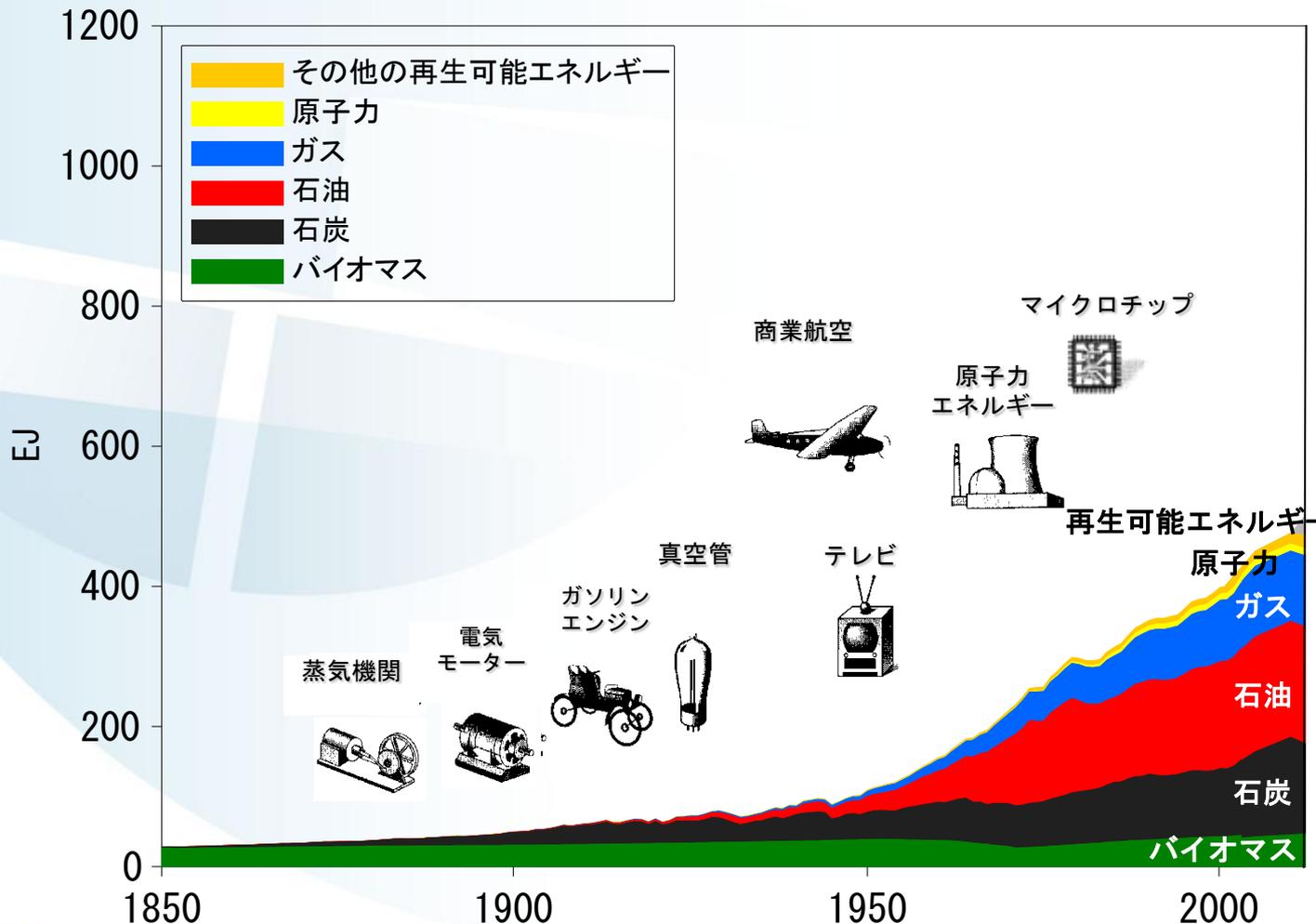
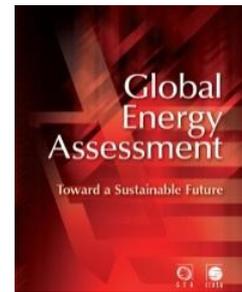
持続可能性への転換



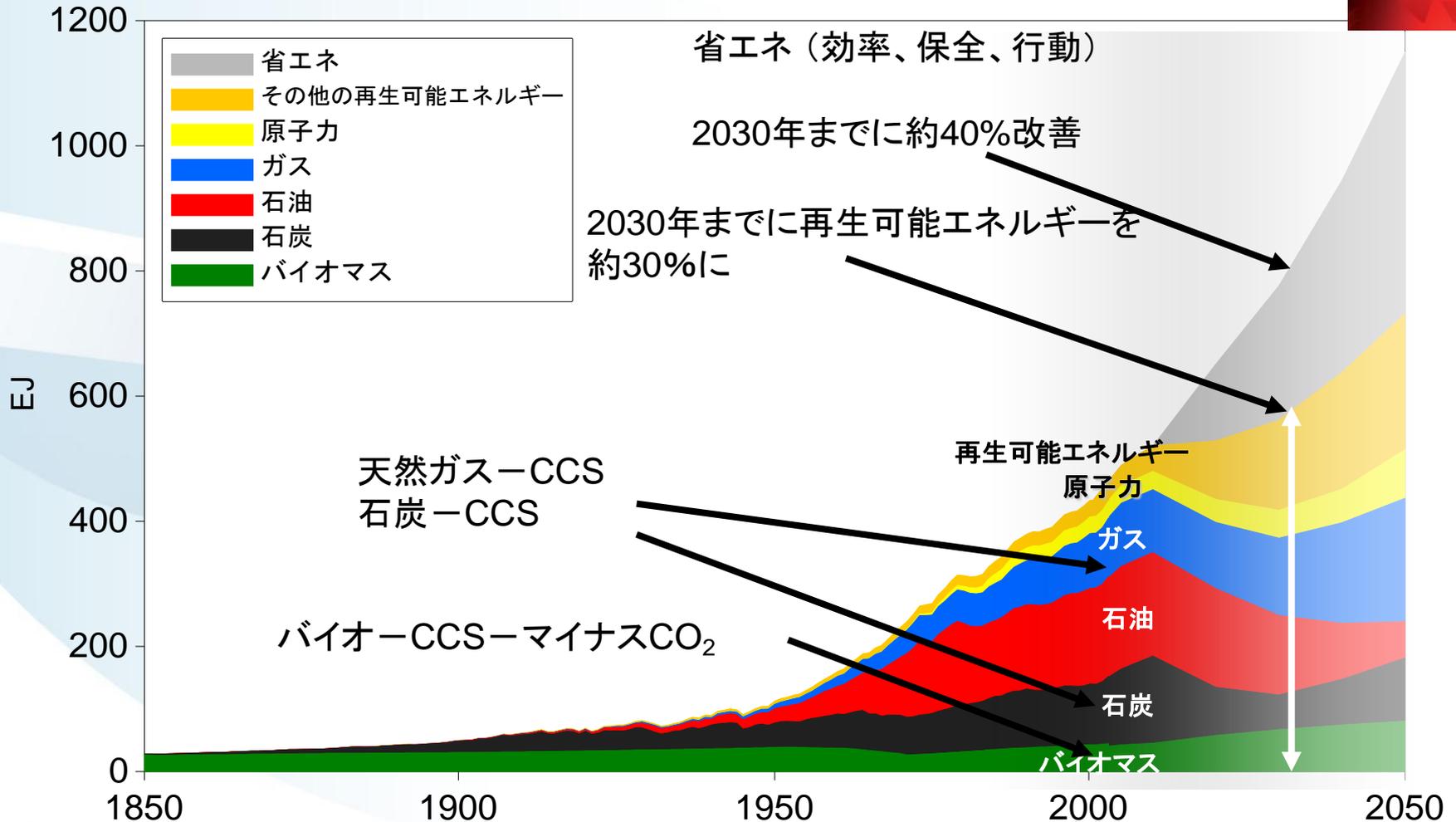
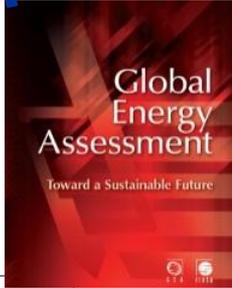
地球の限界内で「少ない労力で大きな成果を上げる」



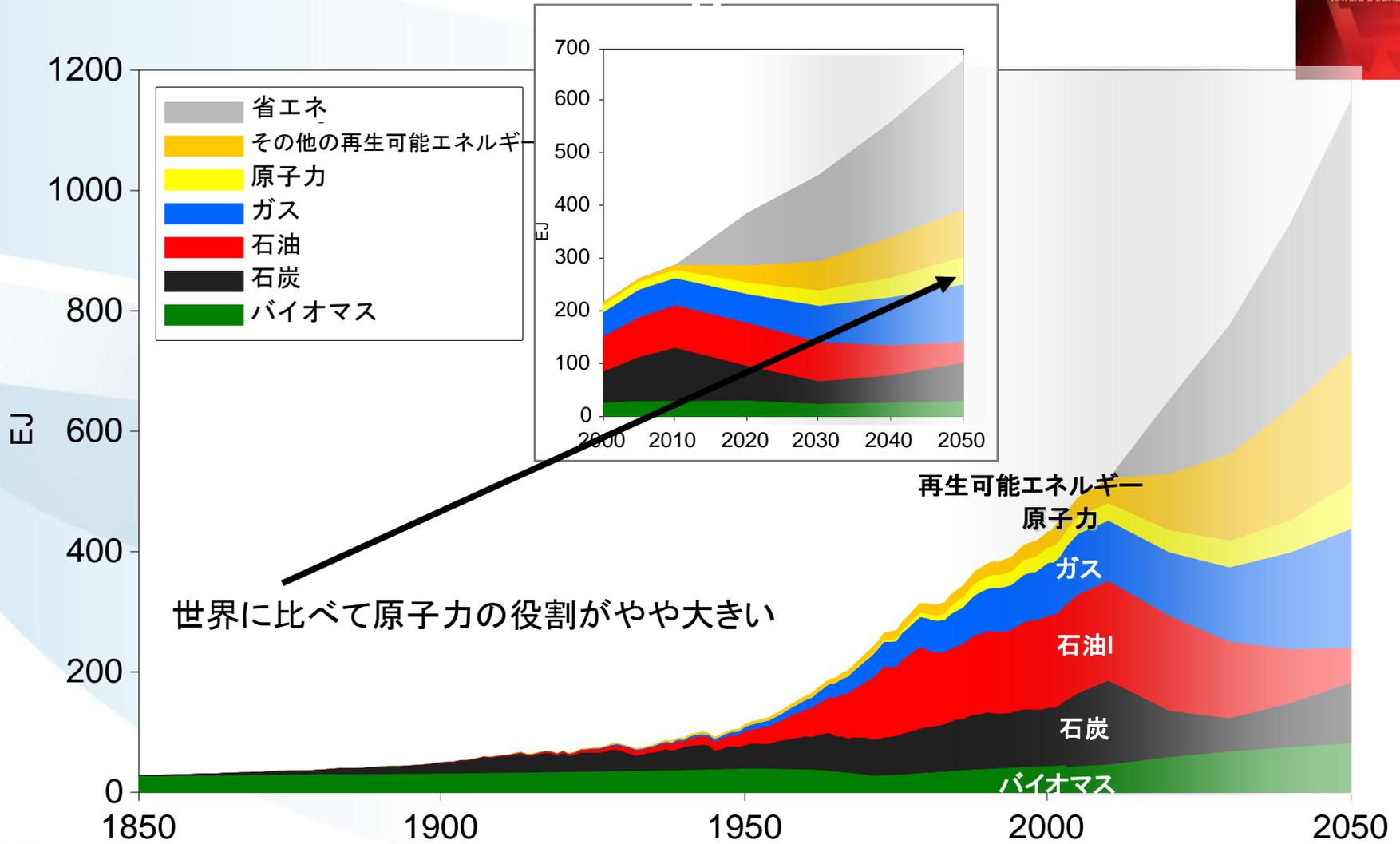
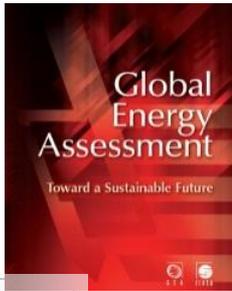
世界の一次エネルギー 歴史的進化



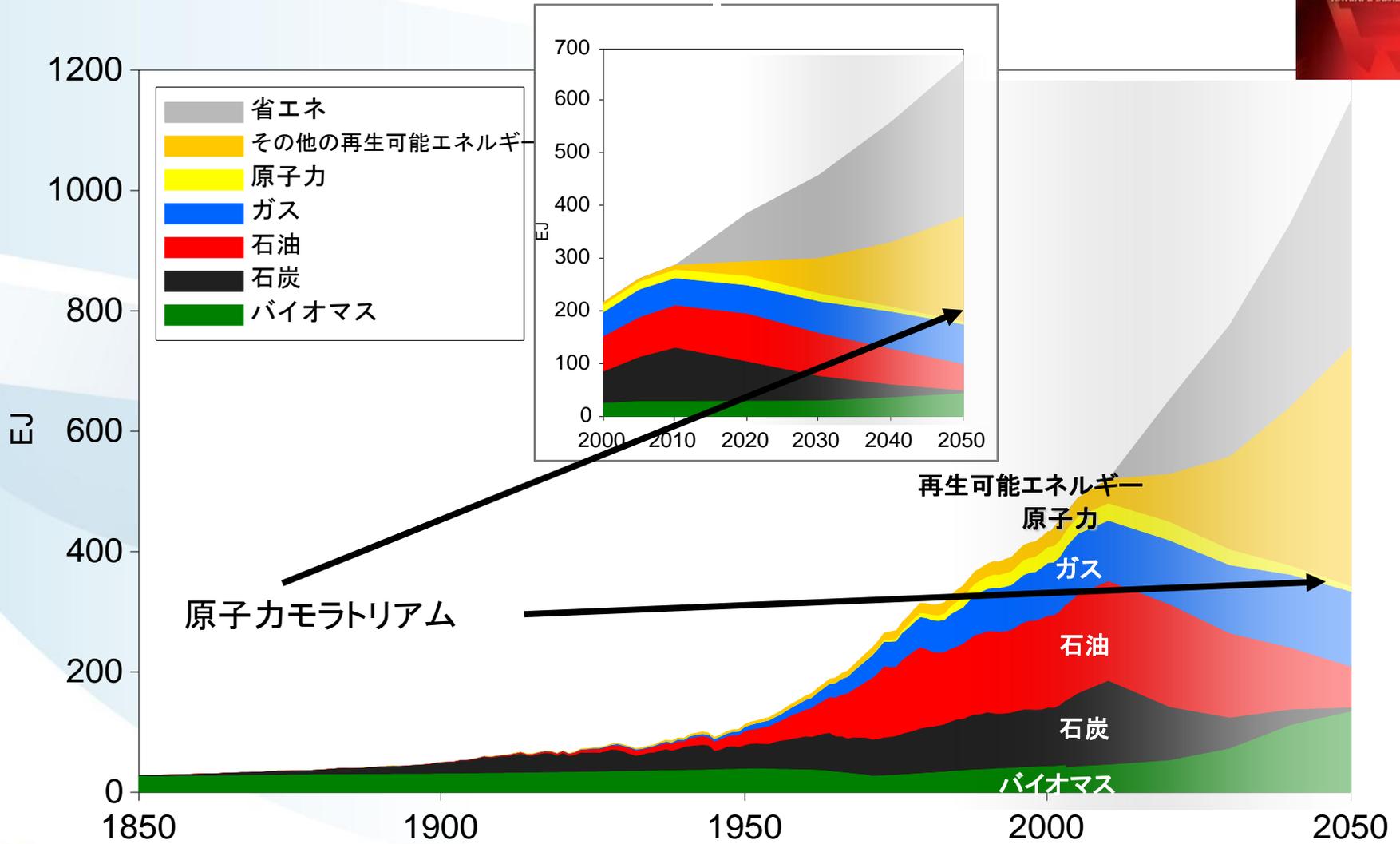
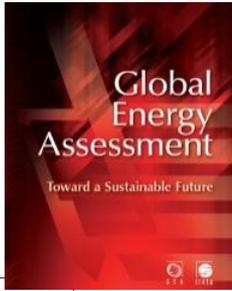
アジア太平洋地域における一次エネルギー 転換への道筋 (I)



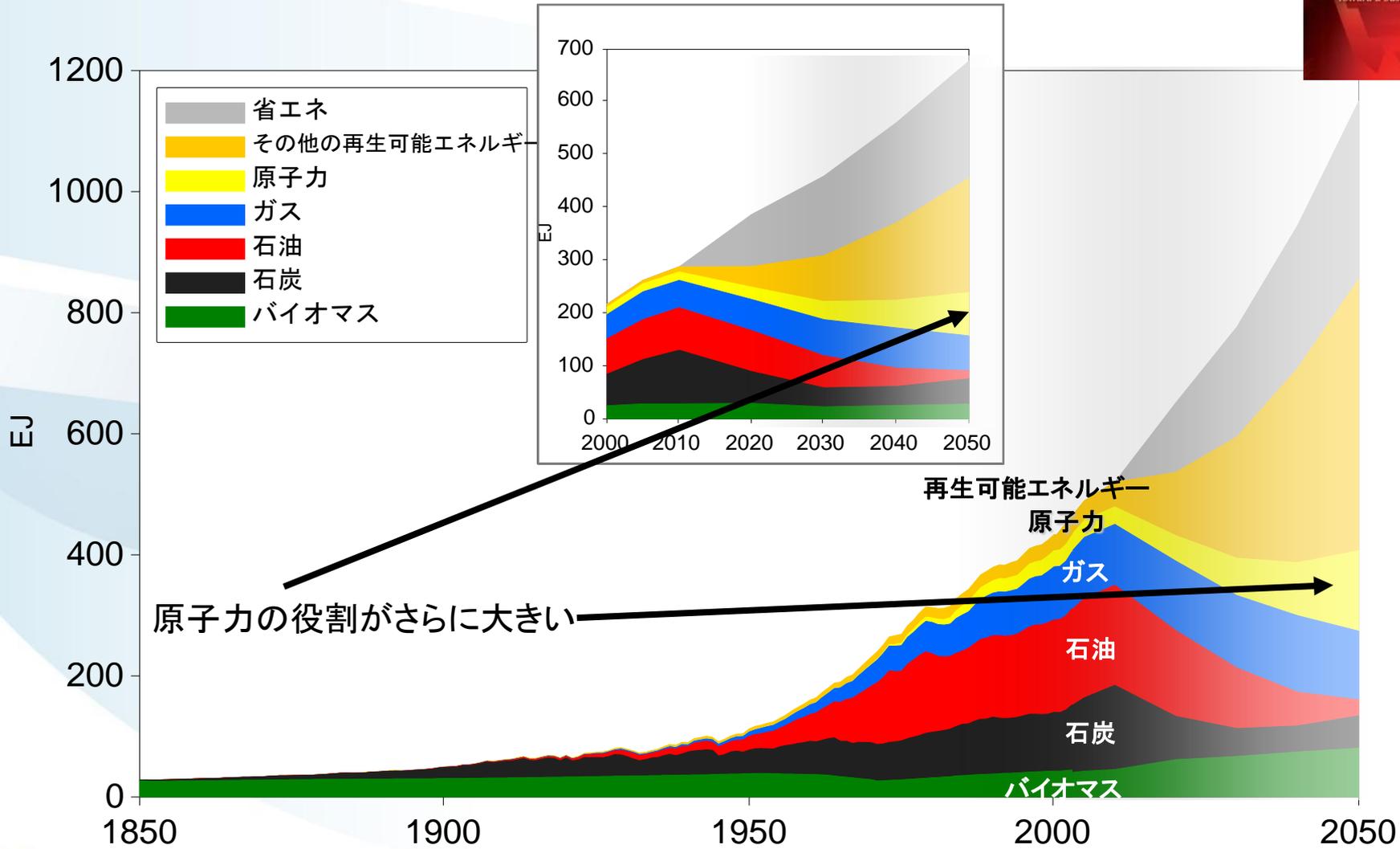
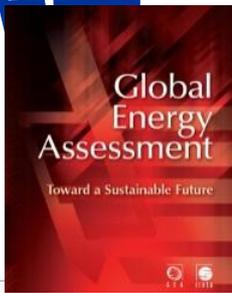
アジア太平洋地域における一次エネルギー 転換への道筋 (I)



アジア太平洋地域における一次エネルギー 転換への道筋 (II)

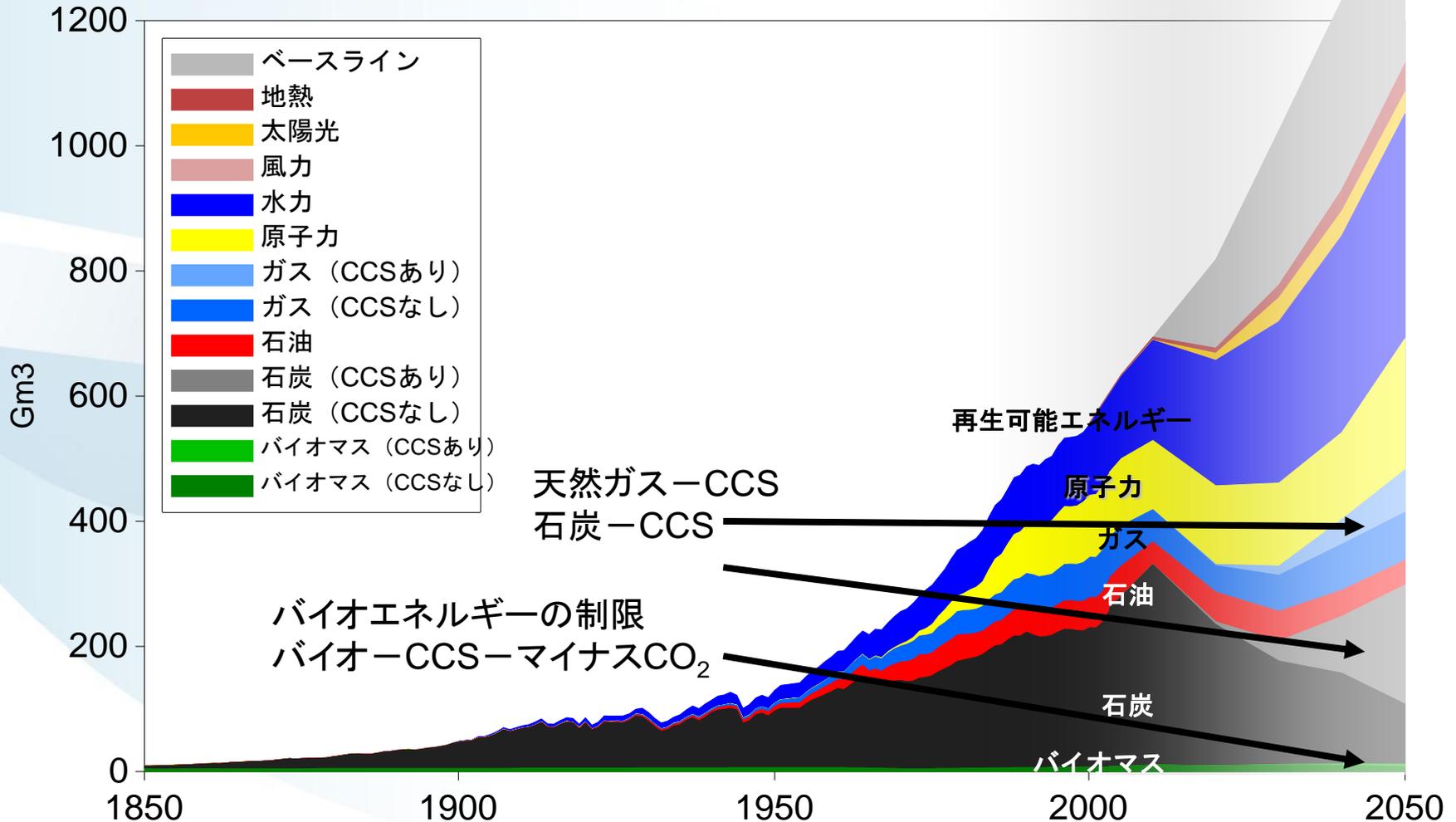


アジア太平洋地域における一次エネルギー 転換への道筋 (III)

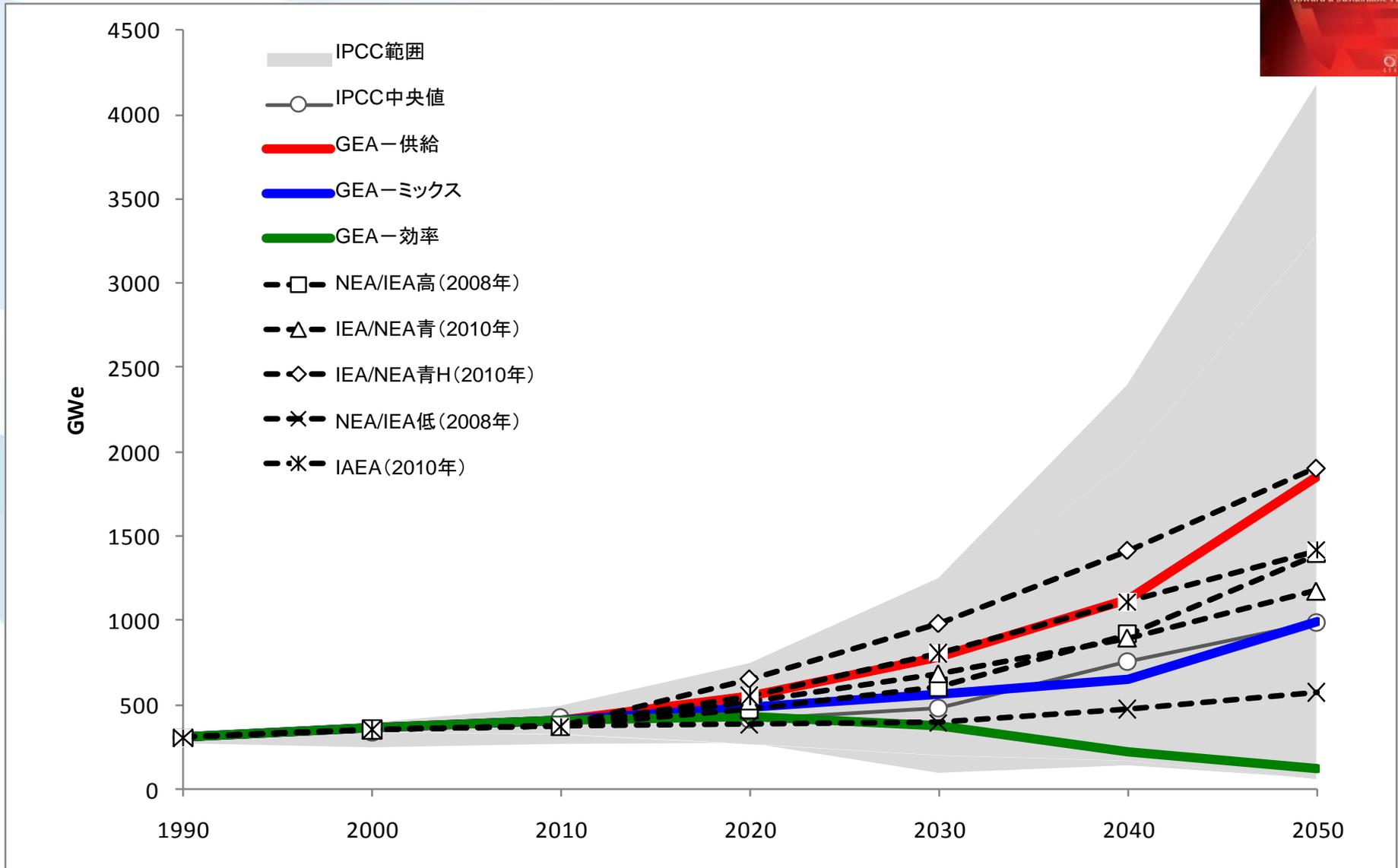


世界の水利用

完全なポートフォリオを含む道筋



GEAの道筋における原子力



原子力開発の段階

| | | 建設開始 | | 送電開始 | | |
|---|------|------------|------------------|----------|------------------|----------|
| | 段階 | 期間 | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW |
| 1 | 開発初期 | 1954～1965年 | 7.4 | 1,332 | 4.2 | 432 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

原子力開発の4つの段階

| | | 建設開始 | | 送電開始 | | |
|----|-------|------------------|----------|------------------|----------|--------|
| 段階 | 期間 | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | |
| 1 | 開発初期 | 1954～1965年 | 7.4 | 1,332 | 4.2 | 432 |
| 2 | 開発加速期 | 1966～1985年 | 24.9 | 20,812 | 17.6 | 12,540 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

原子力開発の4つの段階

| | | 建設開始 | | 送電開始 | | |
|----|-------|------------------|----------|------------------|----------|--------|
| 段階 | 期間 | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | |
| 1 | 開発初期 | 1954～1965年 | 7.4 | 1,332 | 4.2 | 432 |
| 2 | 開発加速期 | 1966～1985年 | 24.9 | 20,812 | 17.6 | 12,540 |
| 3 | 低成長期 | 1986～2004年 | 4.7 | 3,946 | 9.0 | 8,416 |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

原子力開発の4つの段階

| | | 建設開始 | | 送電開始 | | |
|----|--------|------------------|----------|------------------|----------|--------|
| 段階 | 期間 | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | |
| 1 | 開発初期 | 1954～1965年 | 7.4 | 1,332 | 4.2 | 432 |
| 2 | 開発加速期 | 1966～1985年 | 24.9 | 20,812 | 17.6 | 12,540 |
| 3 | 低成長期 | 1986～2004年 | 4.7 | 3,946 | 9.0 | 8,416 |
| 4 | 期待の高まり | 2005～2010年 | 8.8 | 8,722 | 2.7 | 1,996 |
| | | | | | | |

原子力開発の4つの段階

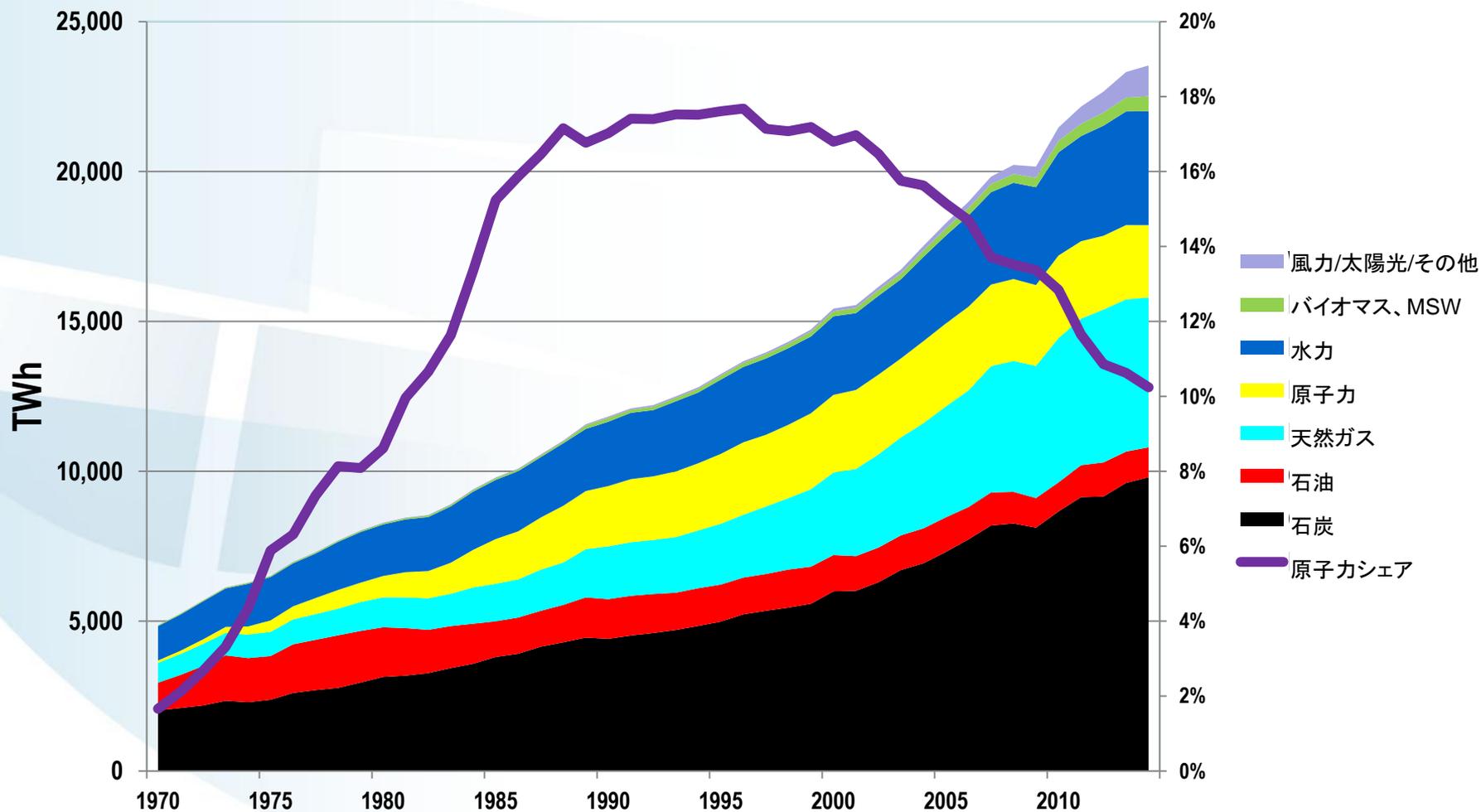
| | | 建設開始 | | 送電開始 | | |
|----|--------|------------------|----------|------------------|----------|--------|
| 段階 | 期間 | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | 年間の 原子炉 基数 | 年間 MW | |
| 1 | 開発初期 | 1954～1965年 | 7.4 | 1,332 | 4.2 | 432 |
| 2 | 開発加速期 | 1966～1985年 | 24.9 | 20,812 | 17.6 | 12,540 |
| 3 | 低成長期 | 1986～2004年 | 4.7 | 3,946 | 9.0 | 8,416 |
| 4 | 期待の高まり | 2005～2010年 | 8.8 | 8,722 | 2.7 | 1,996 |
| 5 | ポスト福島 | 2011年～ | 6.2 | 6,014 | 5.7 | 5,279 |

福島以前の原子力発電

- 1990～2005年間は、運転実績が劇的に向上
- 高い設備利用率
- 出力増強
- 運転認可延長
- 「廃炉」市場
- 金の卵を産む鷲鳥
- 原子力発電所が電力自由化の犠牲になるという従来の“期待・懸念”は、まだ顕在化していない！
- 市場自由化が原子力発電所の新規建設に不利であることが判明



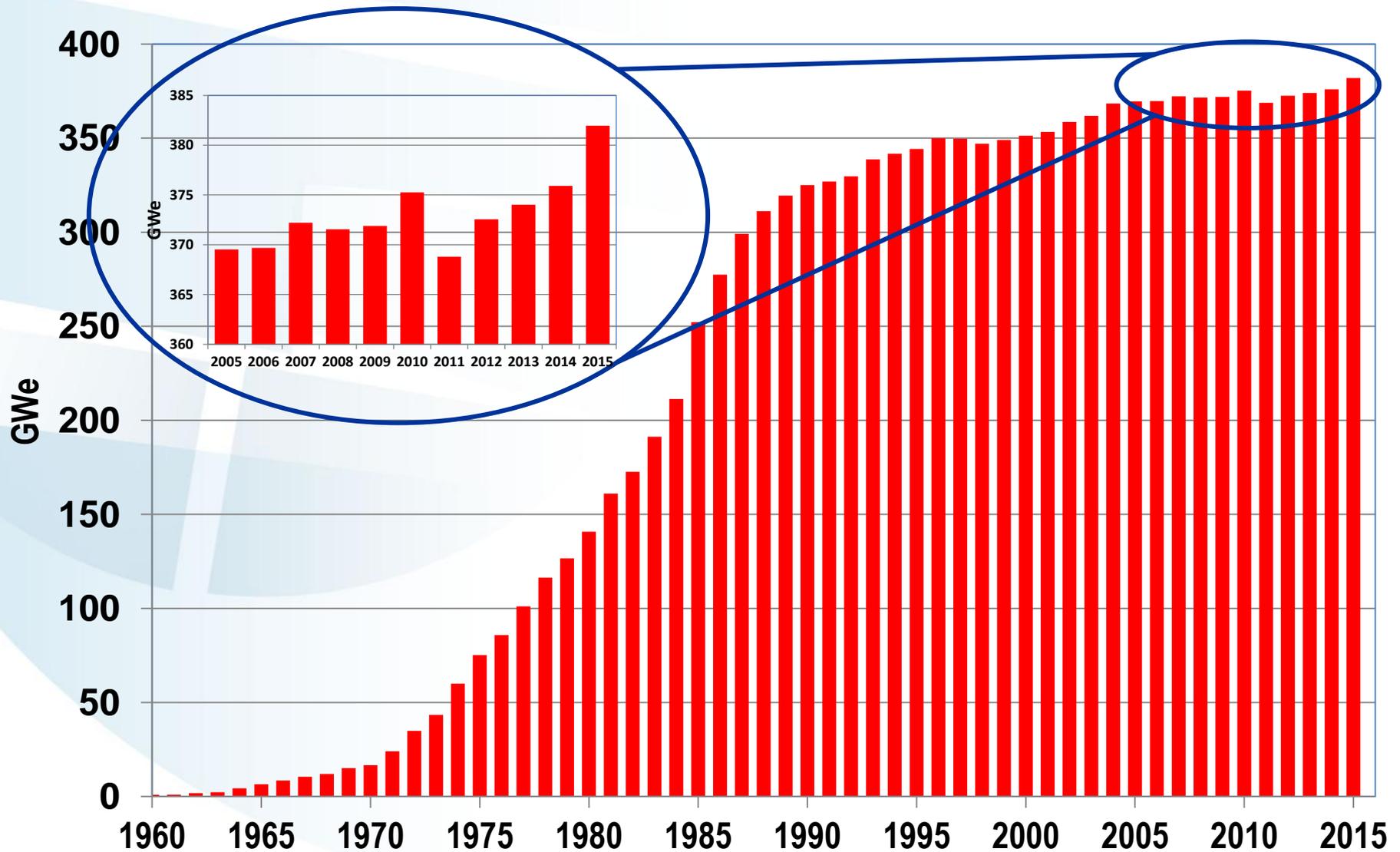
世界の発電電力量と原子カシェア



世界の原子力発電設備容量

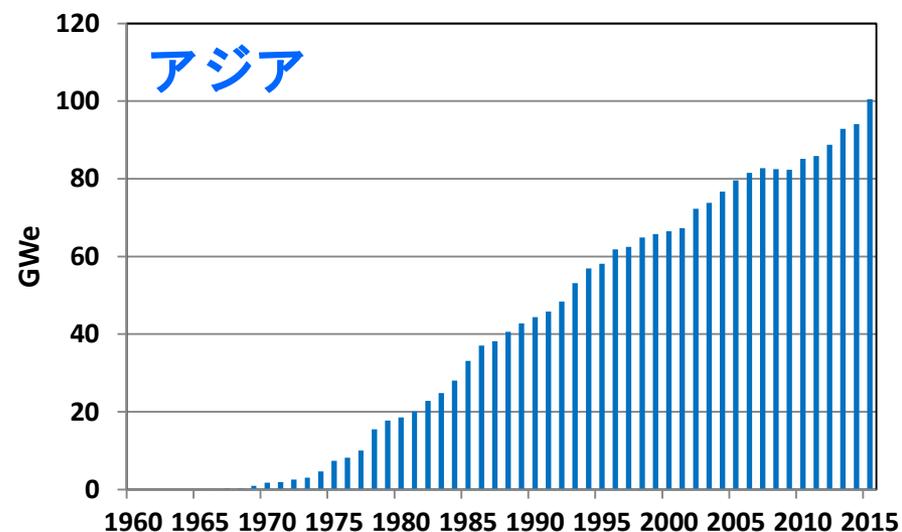
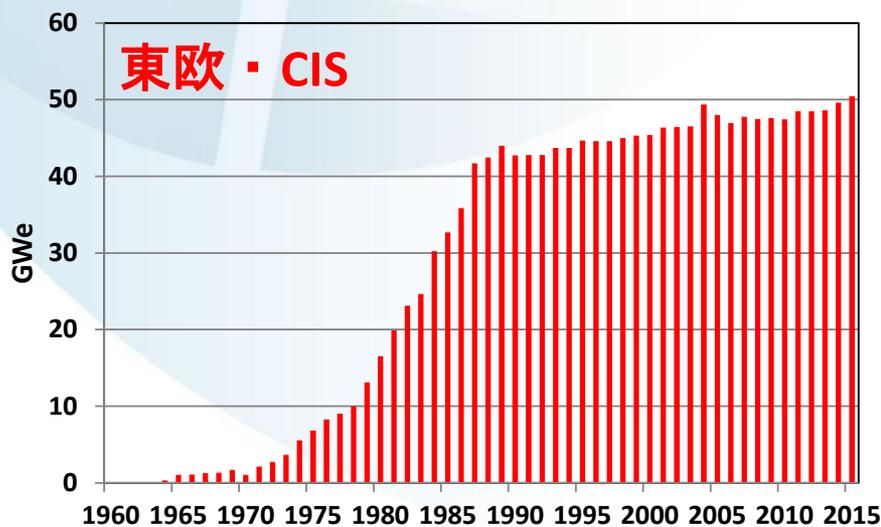
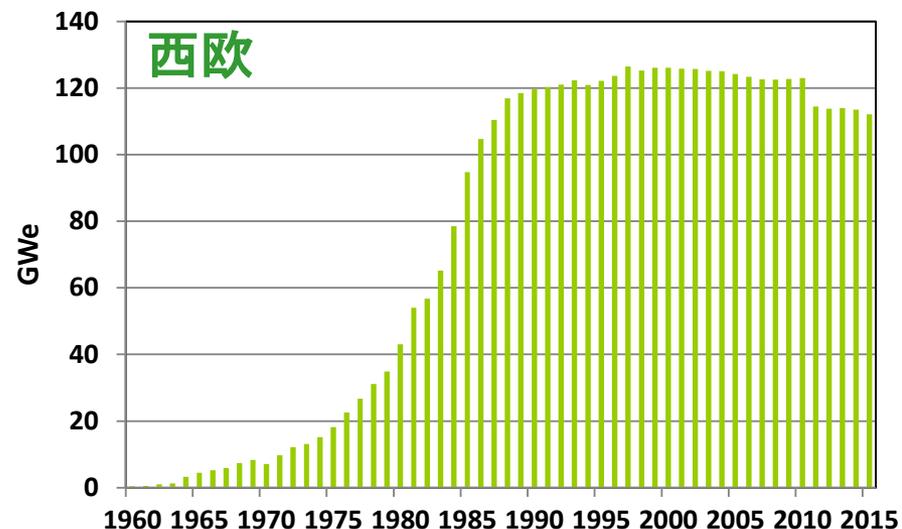
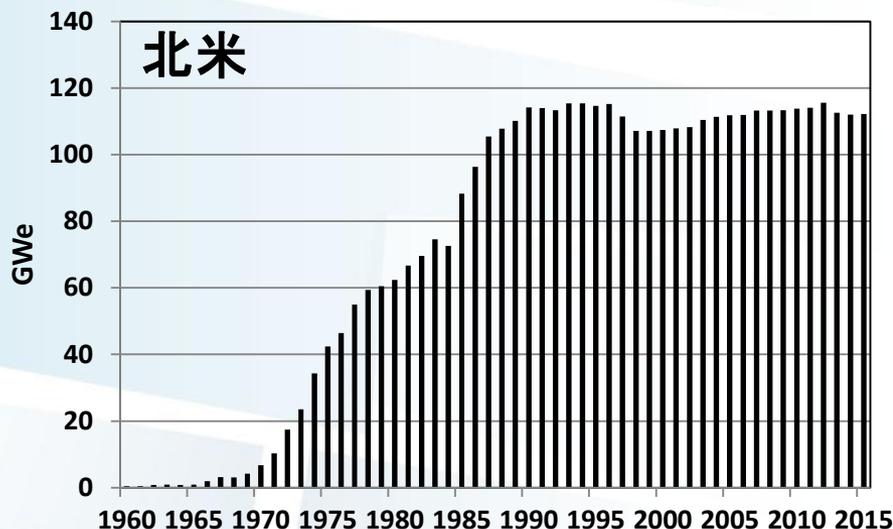
(2015年12月31日現在)

2015年12月31日現在
出典：IAEA - PRISを元に作成



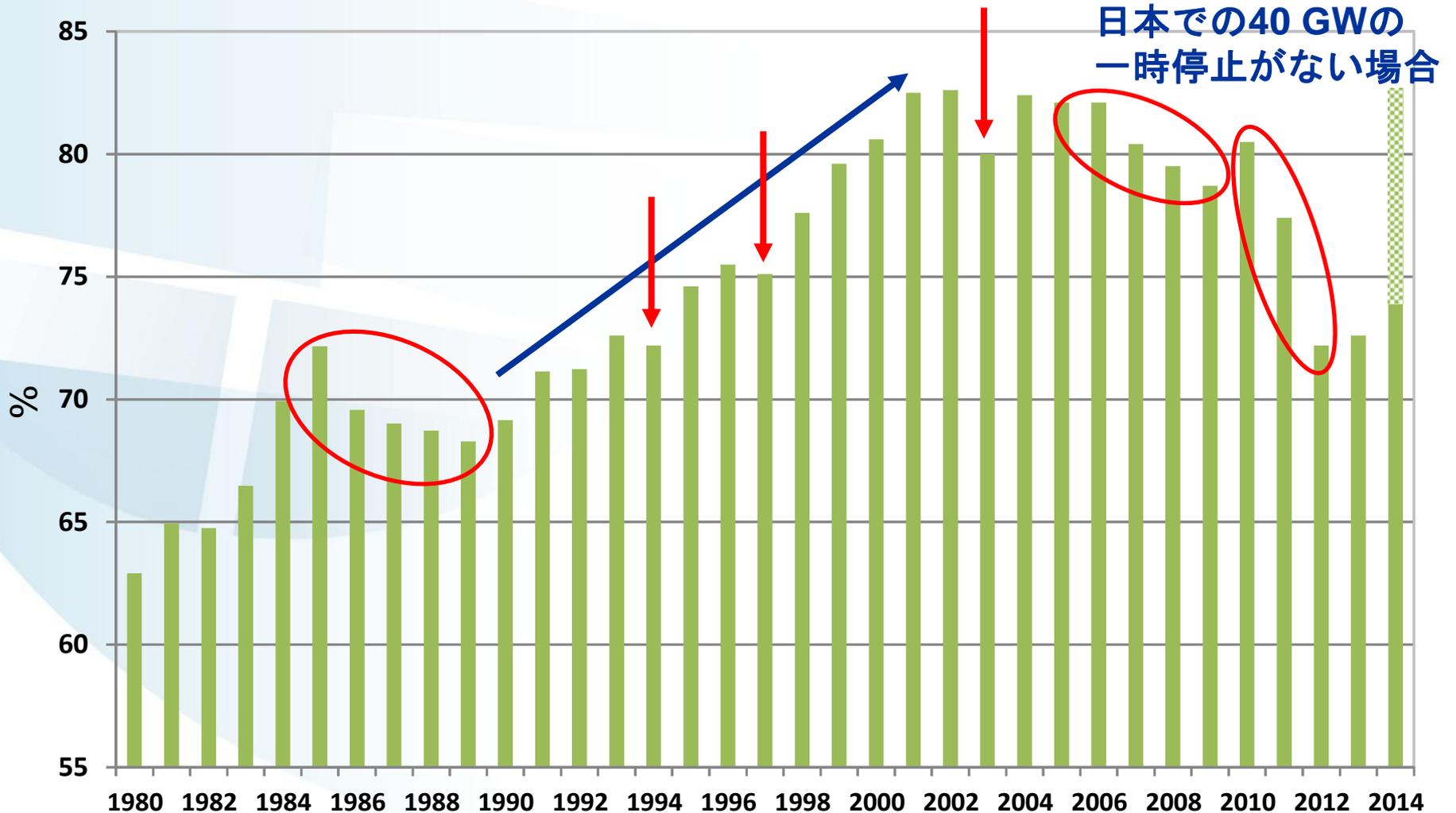
地域別の原子力発電設備容量

2015年12月31日現在
出典：IAEA - PRISを元に作成



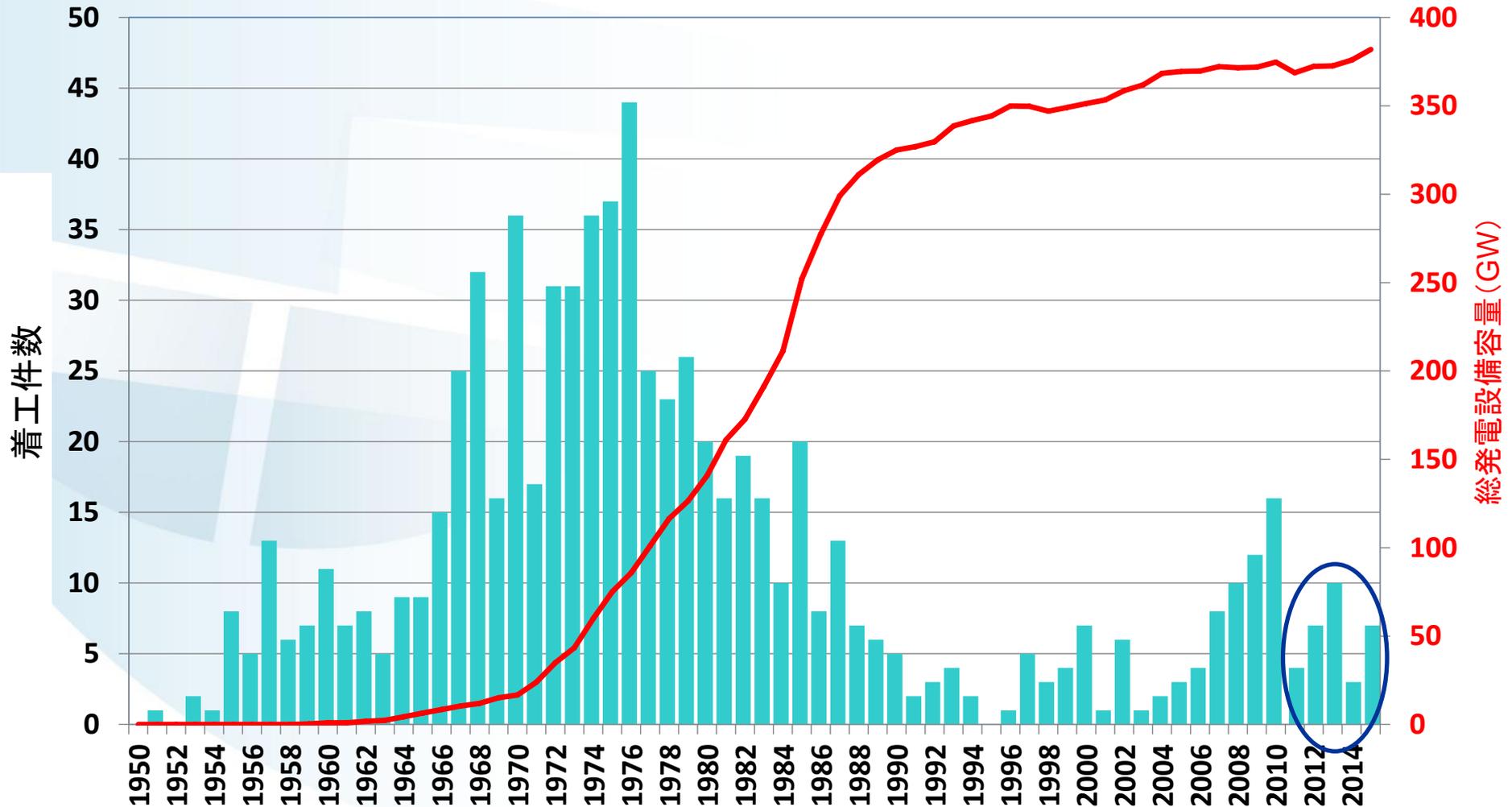
設備利用率：世界の原子炉

1990～2000年：実績の向上は、1,000 MWの34原子力発電所の建設に相当する



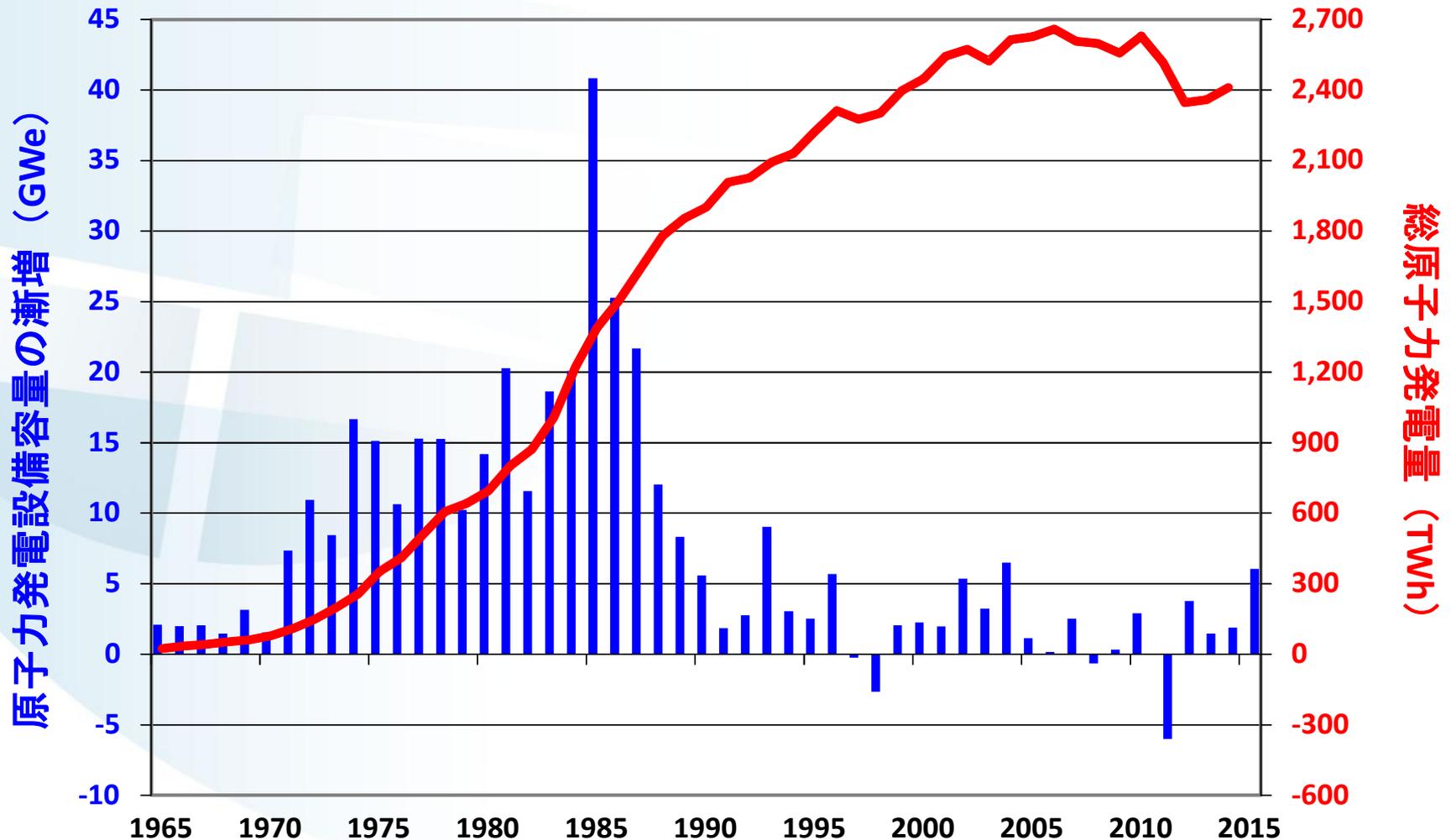
1950年～2015年の着工件数

2015年12月31日現在
出典：IAEA - PRISを元に作成

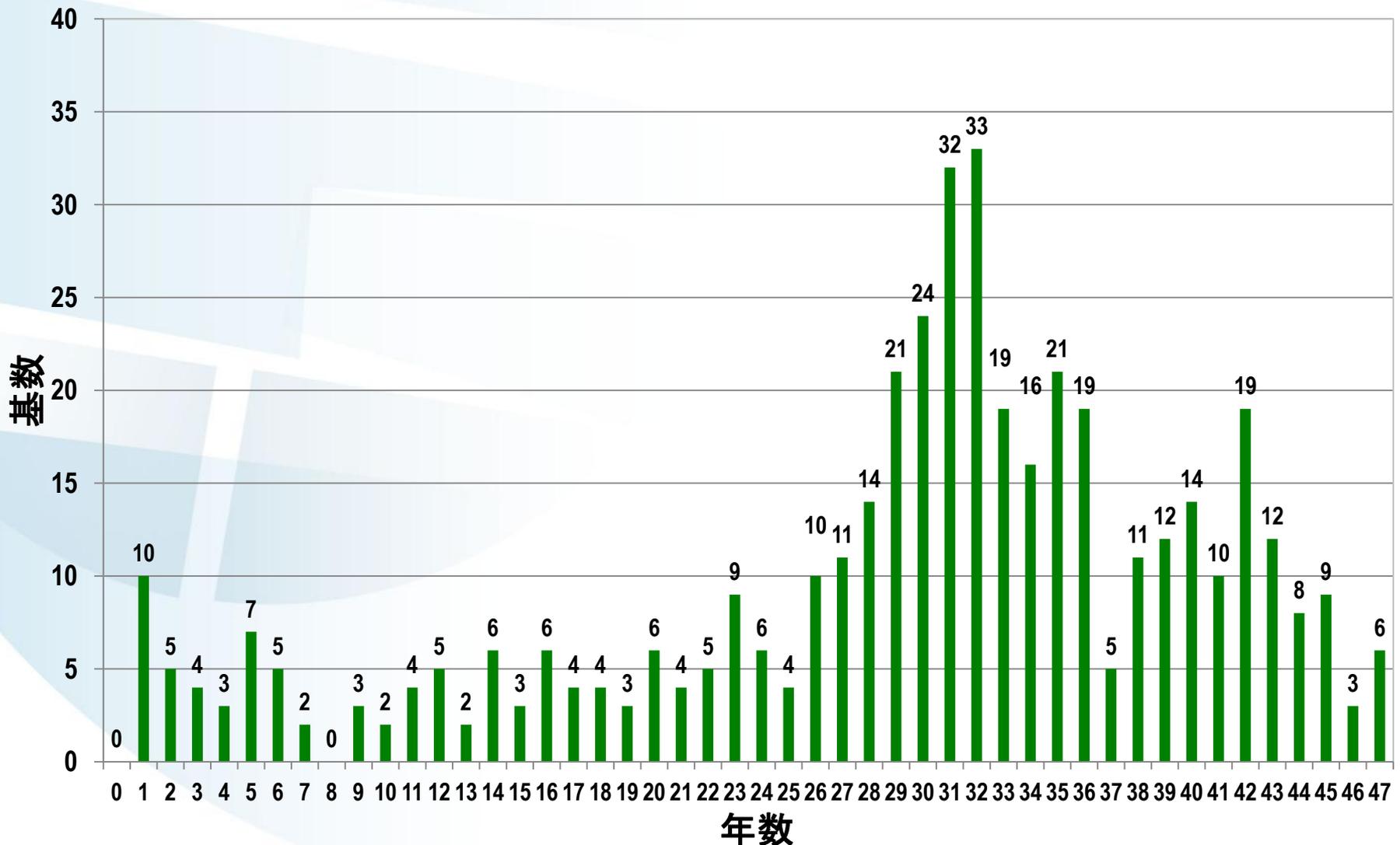


原子力発電設備容量の追加と 発電量

2015年12月31日現在
出典：IAEA - PRISを元に作成



原子力発電所の経過年数



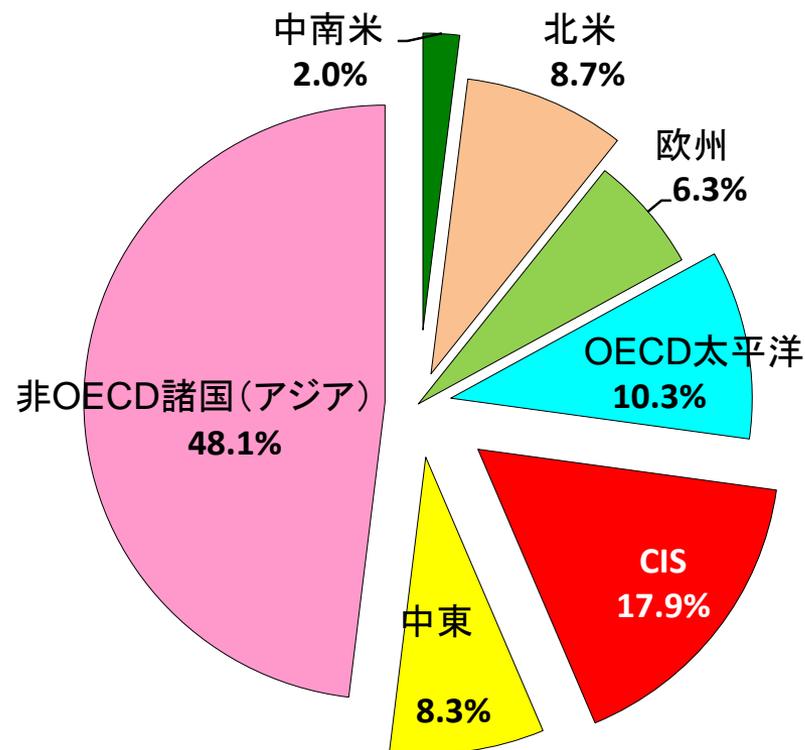
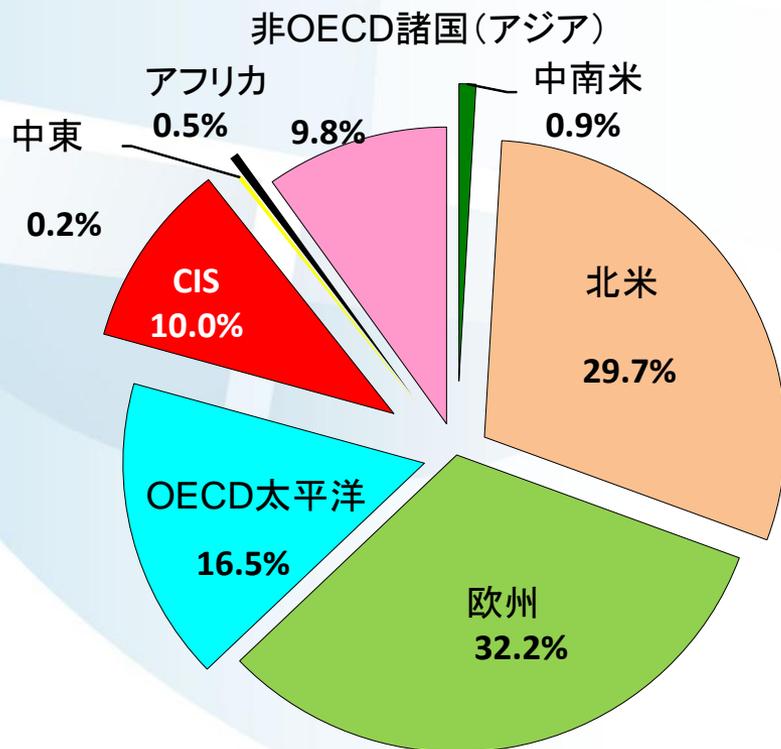
注：原子炉の経過年数は、最初の送電開始によって判定される。今年送電開始した原子炉は経過年数0年とする

世界の原子力発電の状況

2016年3月29日現在
出典：IAEA - PRISを元に作成

稼動中：442基
384.2 GWe

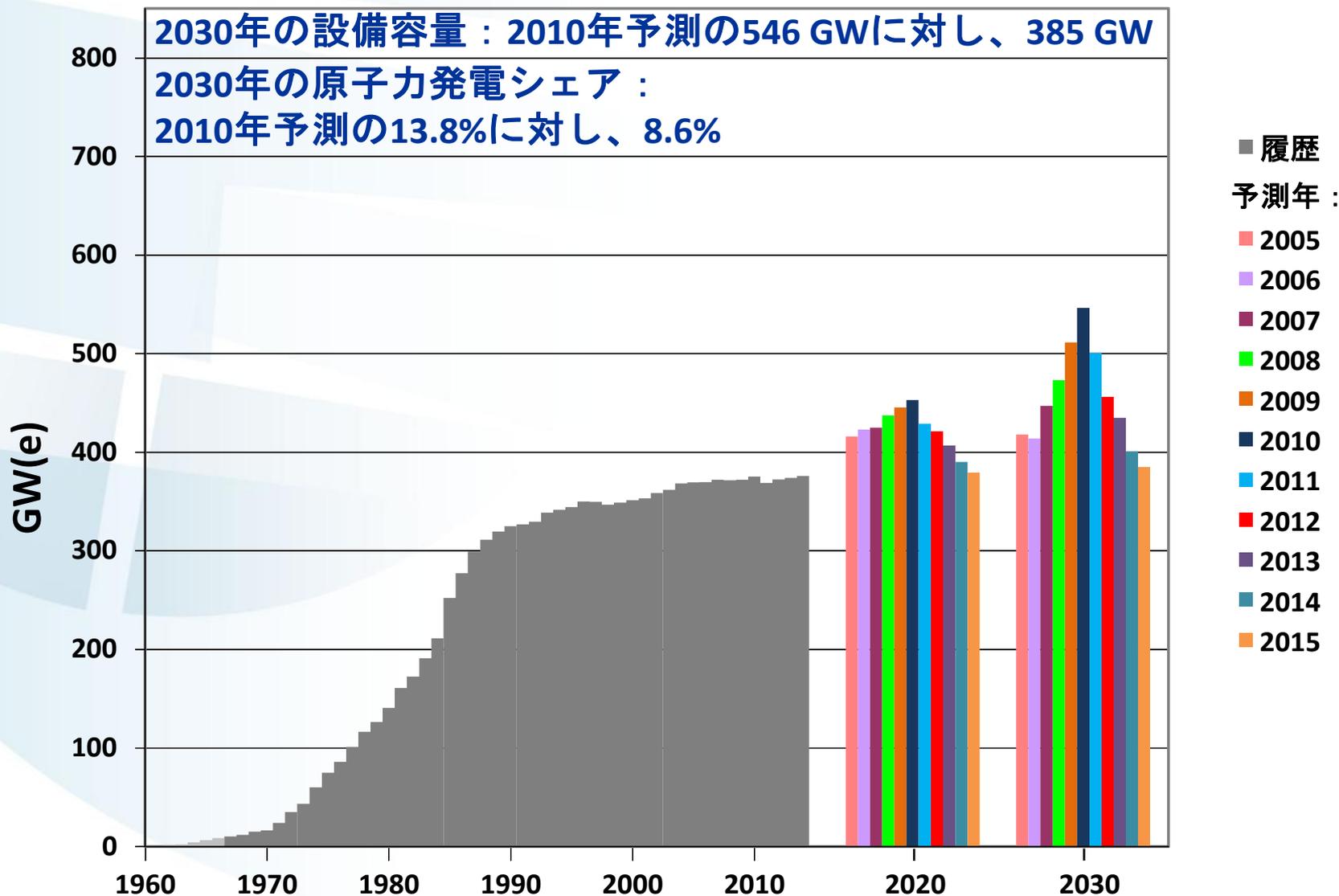
建設中：66基
65.0 GWe



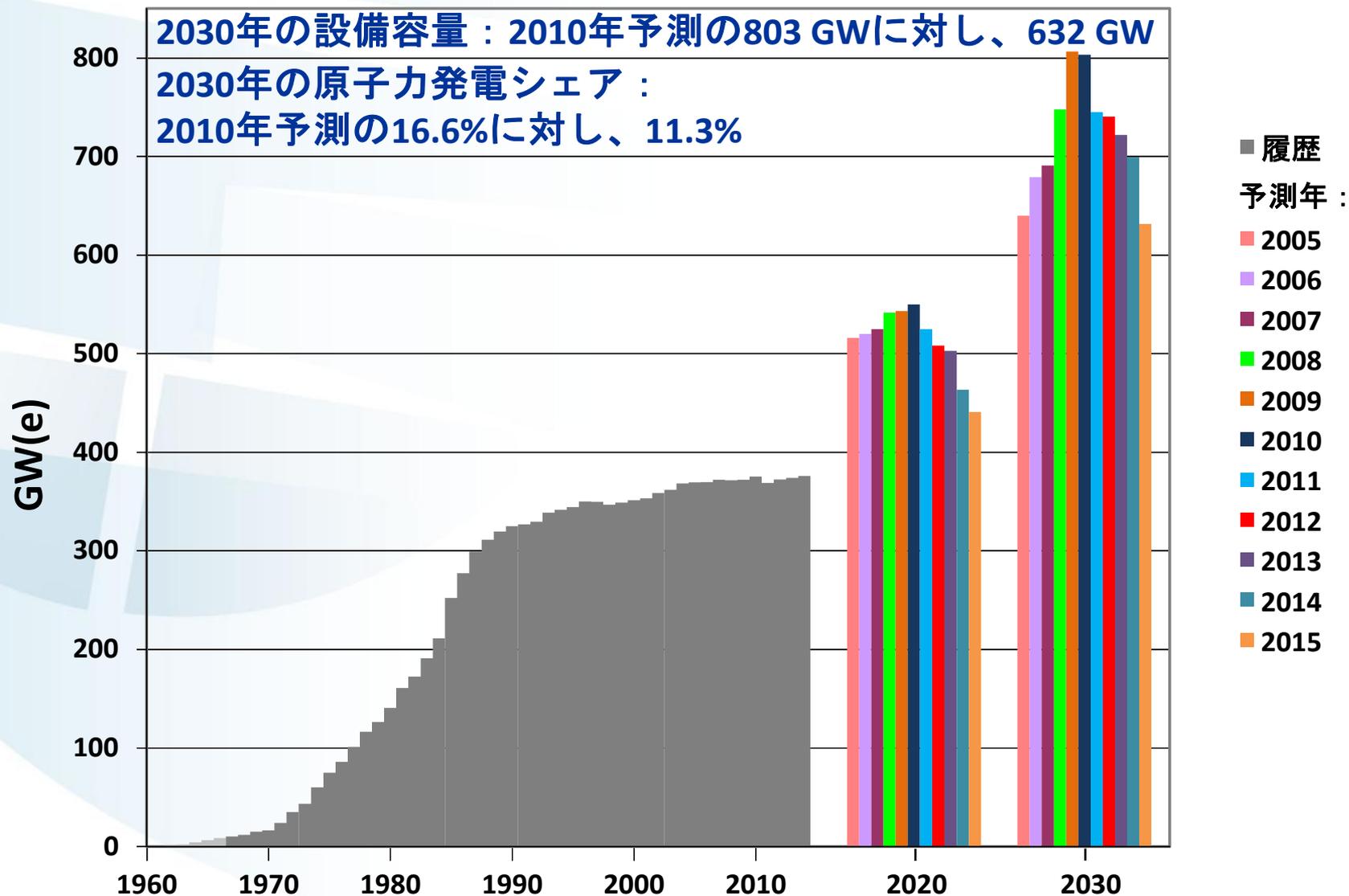
海軍原子炉

- ➡ 米国では、原子炉約130基が潜水艦、航空母艦、巡洋艦、駆逐艦の一次推進力および発電に使用されている
- ➡ 5,400炉年にわたって安全に運転してきた
- ➡ 商用原子炉より高濃縮度の燃料を使用する
- ➡ ロシア約100基、フランス約20基、英国約20基、中国約6基が一次推進力に使用されている
- ➡ 原子炉運転の訓練を受けた人員の供給源となる

IAEA－世界の原子力が低位に推移するシナリオ



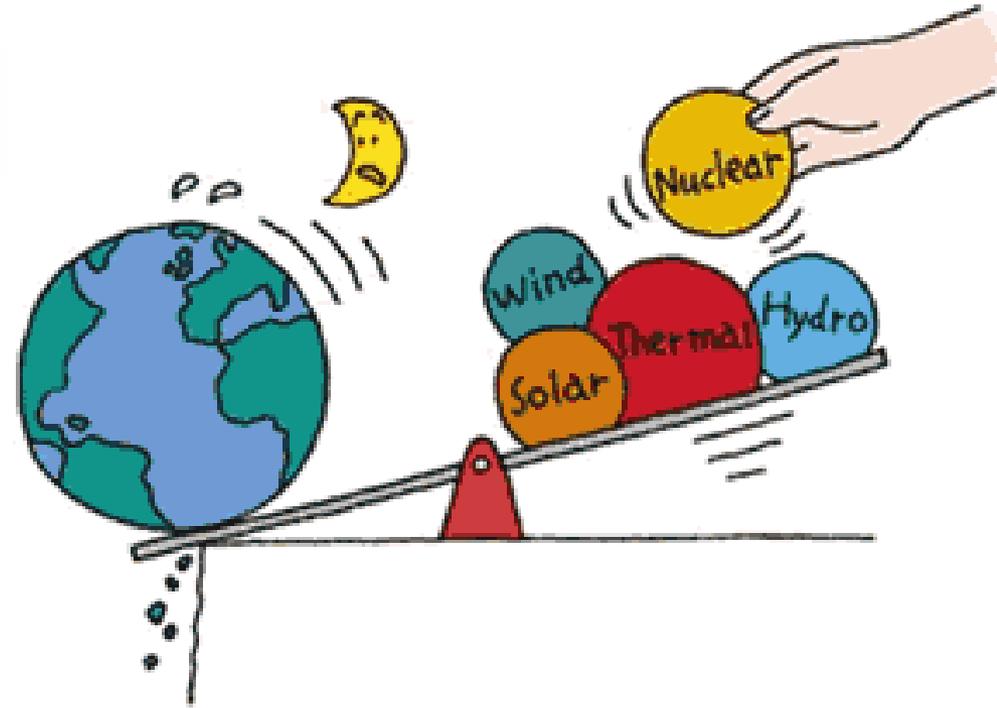
IAEA－世界の原子力が高位に推移するシナリオ



関心が再び高まっている原動力

- 世界のエネルギー需要の継続的成長
- エネルギー安全保障
- 化石燃料価格の変動
- 低コストのベースロード電力に対する要求
- 環境保護と気候変動
- 原子力：

1990年代初頭から運転が改善され、高い経済性を誇り安全記録を打ち立てている



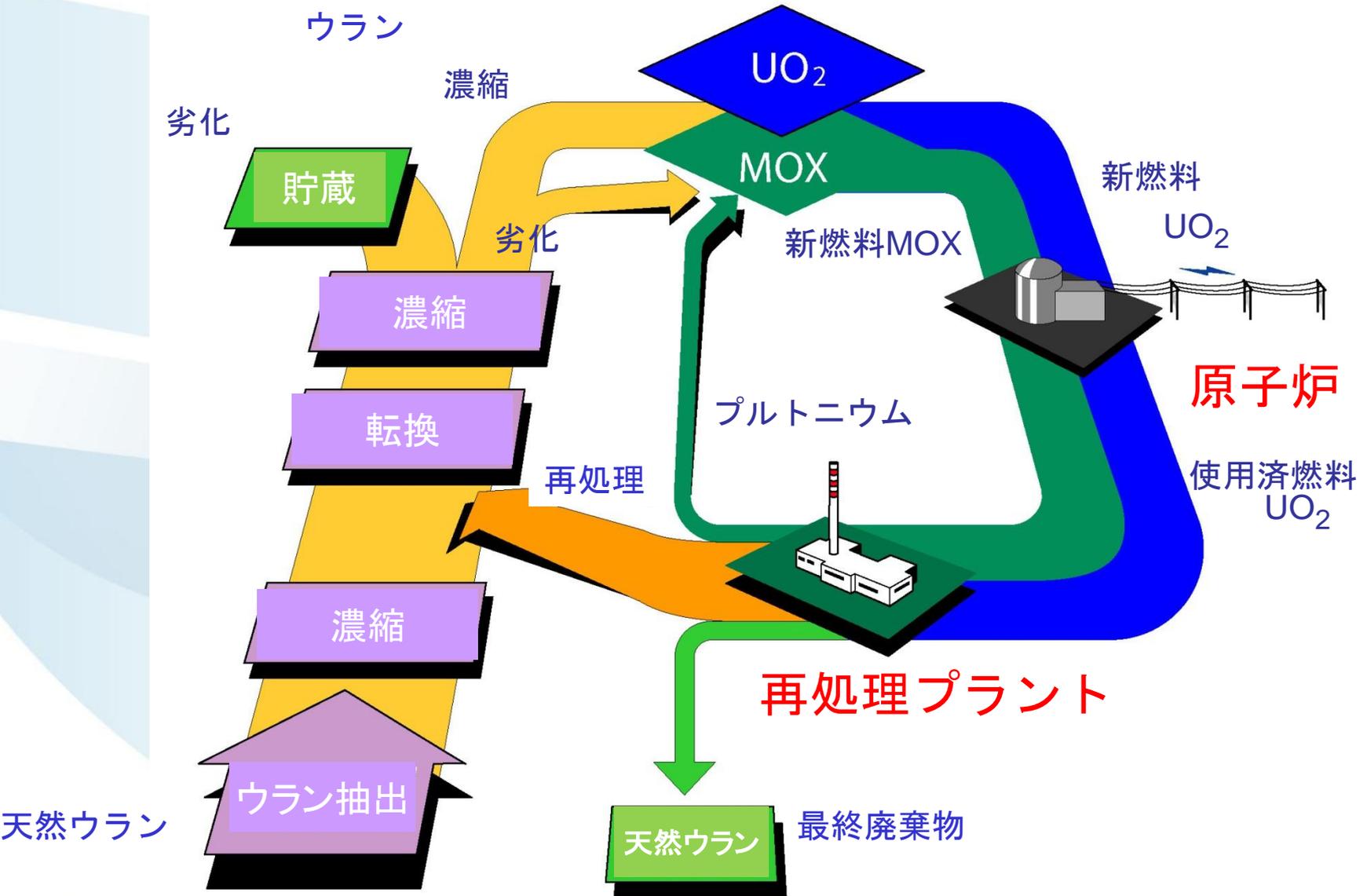
経済危機にもかかわらず

- 1990年代中盤以降、かつてないほど、高い見込み

革新的ソリューションには 研究開発が必要

- ➡ 安全性、経済性、貯蔵、不拡散
- ➡ 高性能モジュール型、標準設計プラント
- ➡ 採掘が容易で安価な²³⁵U埋蔵量は限られる
- ➡ ワンススルー燃料サイクルでは、エネルギーの95%が無駄になる
- ➡ 燃料サイクルでは、実質的に無限（1万年分）の原子力エネルギーが提供され、高レベル放射性廃棄物が大幅に削減される
- ➡ 核融合を含む、根本的に新しい設計

核燃料の加工



ITER設計が最終決定された

2001年5月

サイズ: JETの3倍

プラズマ電流: 15 MA

プラズマ体積: 837 m³

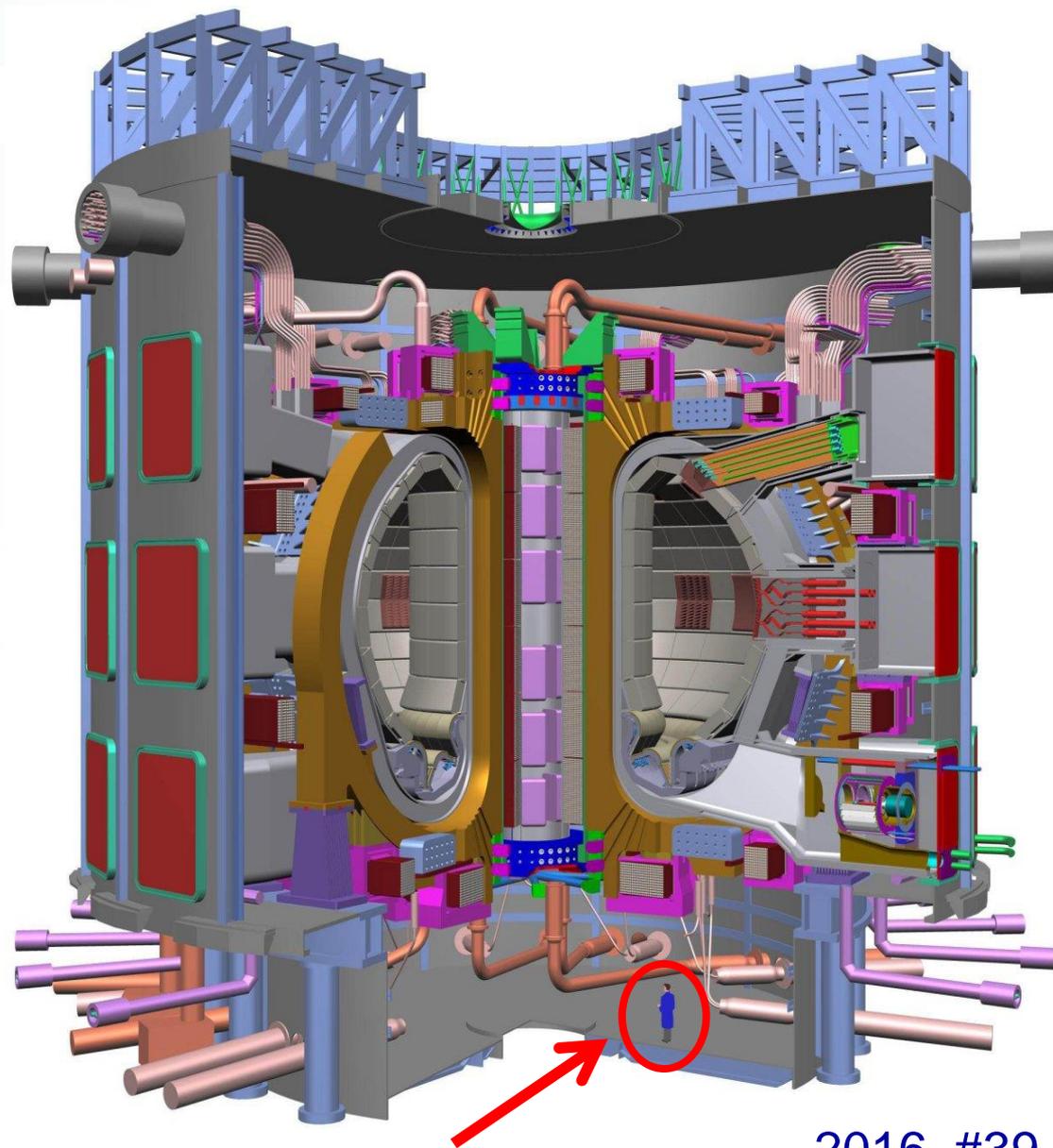
プラズマ表面積: 678 m²

B = 5.3 T @ 6.2m

500 MW、500秒、Q > 10

R = 6.2 m

最終科学実証

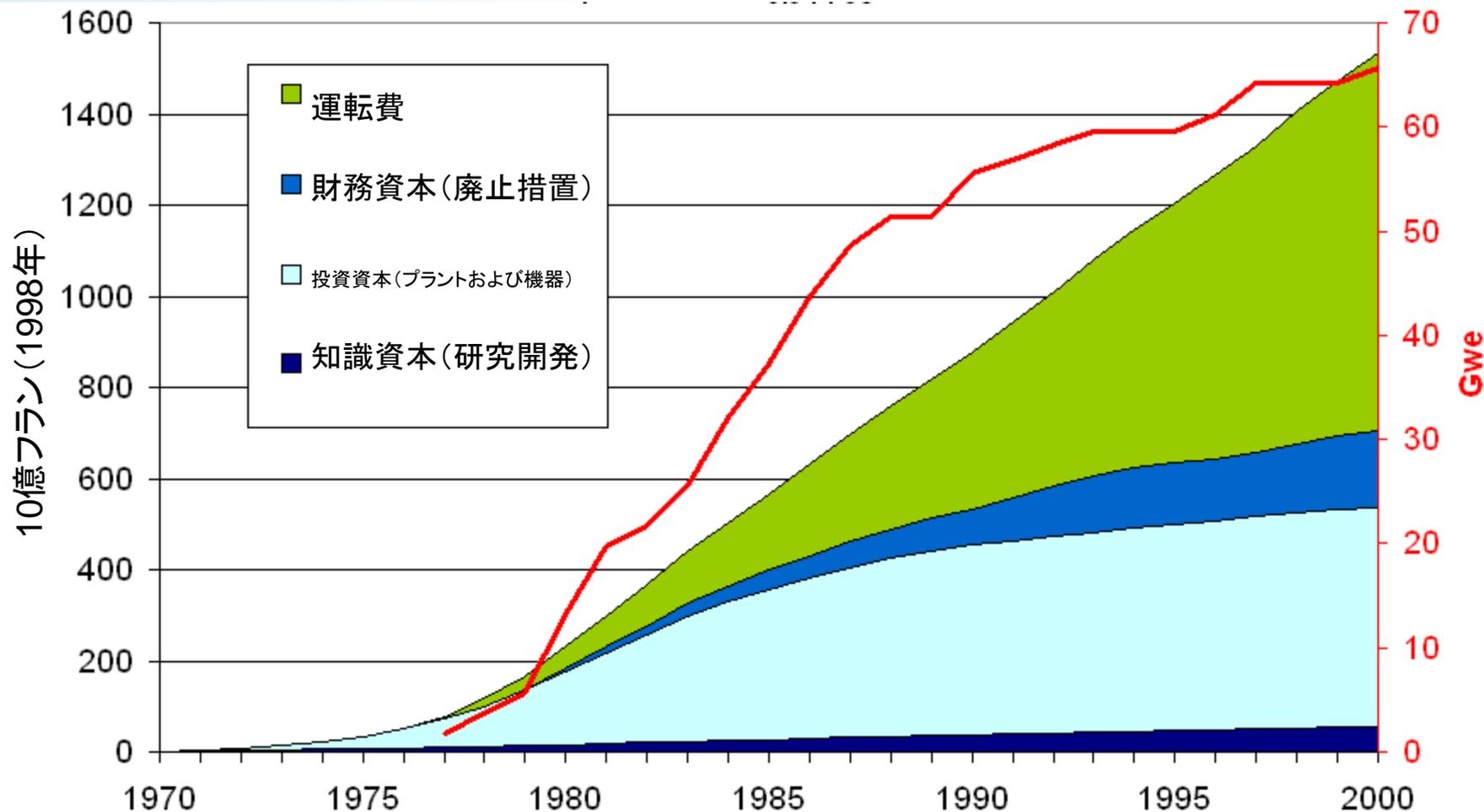


フランスの原子炉

- ⇒ 58基、正味で63 GW（総計で66 GW）
- ⇒ 10年間（1980～1990年）で約50 GW
- ⇒ 高度な標準化：
 - 925 MW PWR ウェスチングハウスのライセンス
 - 1,350 MW PWR 仏製機器を最大限に利用した新型
 - 1,550 MW PWR N4、1650 EPRに先行（標準化が不十分）

フランスの原子力発電所 総費用

1970~2000年 = 1兆5,000億フランスフラン(1998年) = 約2,500億ドル

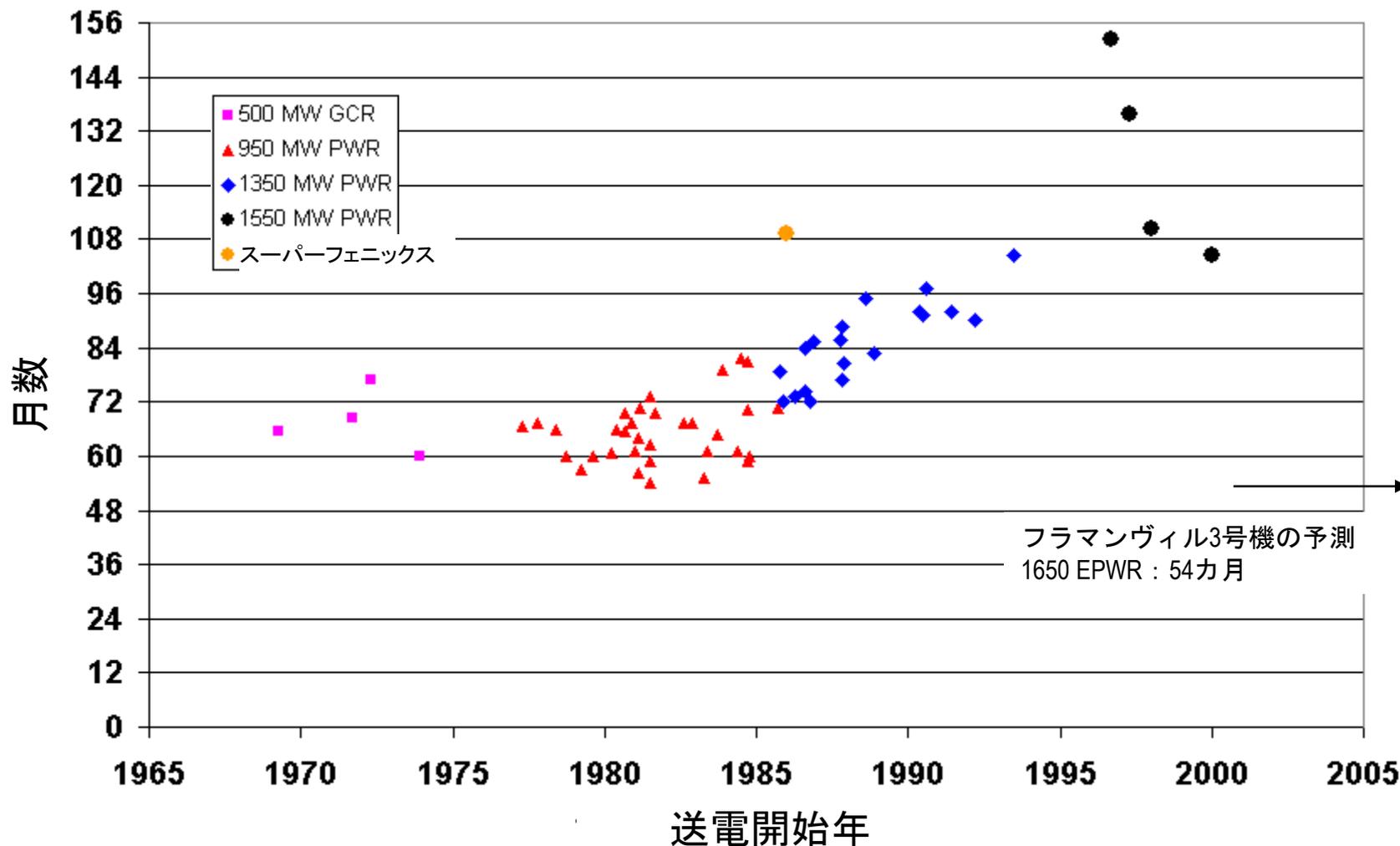


拡大”成功”の構造

- ⇒ 80%が原子力発電
- ⇒ 負荷管理およびモジュール化
- ⇒ 重大事故が起っていない
- ⇒ 世論の反対がほとんどない
- ⇒ 安定した規制環境
(テクノクラートのグランゼコール・エリート)
- ⇒ 技術の継続的開発 (拡大)
- ⇒ 全面的な産業の育成 (燃料サイクルを含む)

建設期間

(着工から送電開始まで)

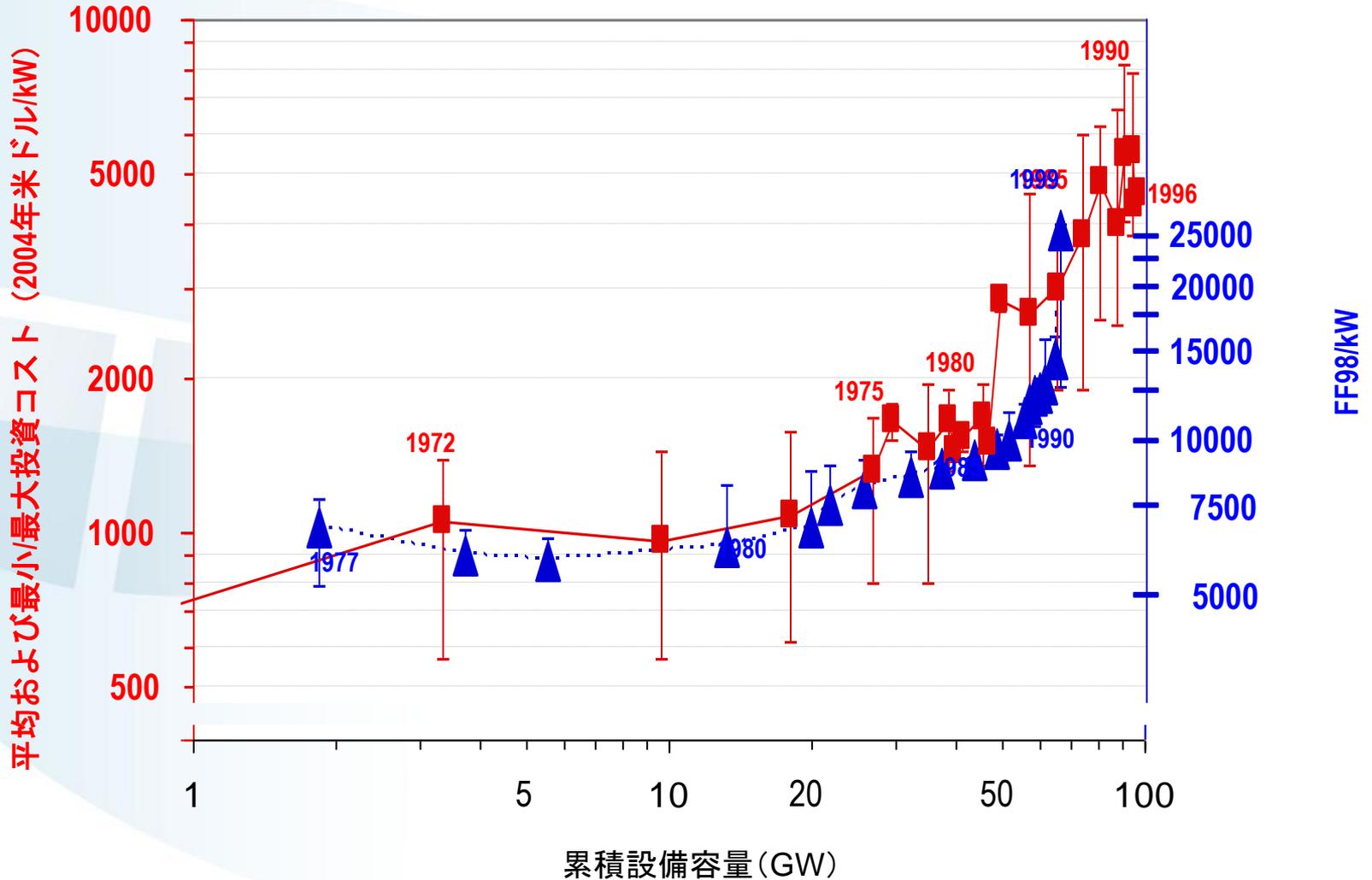


データ出典：IAEA PRIS (2009年)

フランス原子力発電所の 先を見越す

- ➡ 米国でも（極端ではないが）同様のパターン
- ➡ 「負の」学習：技術固有ではなく、規制環境に伴うコストの増大
- ➡ 件数の増加とプラント減少に伴う規模の不経済
- ➡ 「小型炉」（小規模ユニットスケール）および標準設計の利点

米国とフランスの原子力発電所 「負の」発見的学習

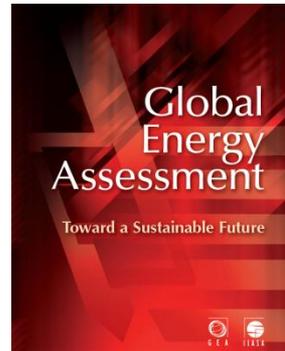
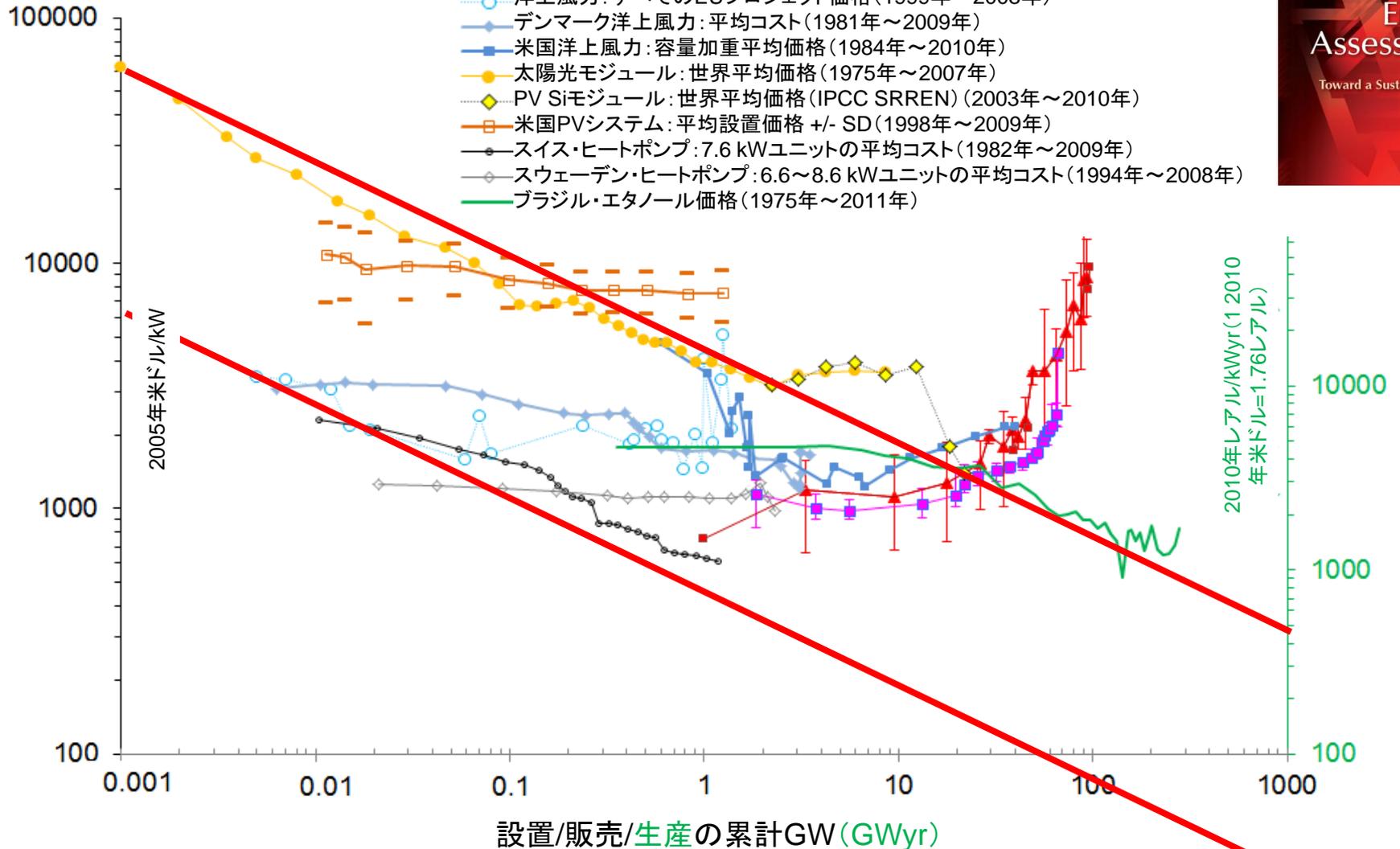


まとめ

- ➡ 最も成功したOECD原子力拡大計画でさえ大幅なコストが増大
- ➡ コスト増大の理由：
 - 原子炉サイズのスケールアップ（経済へのマイナス影響）
 - 国内企業のみで生産（知識のスピルオーバー効果が少ない）
 - 標準設計からの乖離
（N4/pre-EPR：EDFではなくCEAが決定する）
 - 原子力拡大計画の後退
（vs. 熱狂的な予測と長期の建設期間）
- ➡ 将来に対する課題－コストの不確実性
 - 試行錯誤－解決という方法論の課題
 - 小型炉のさらなる展開の必要性（標準モジュール設計）

供給技術のコスト傾向

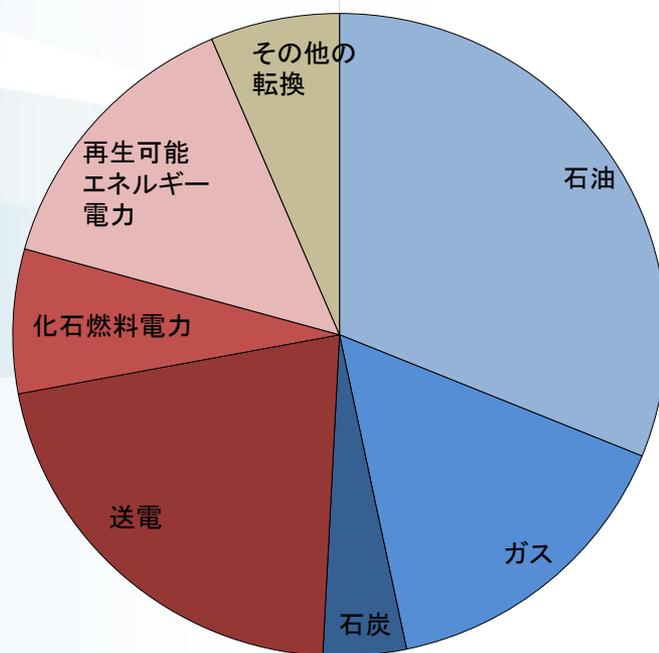
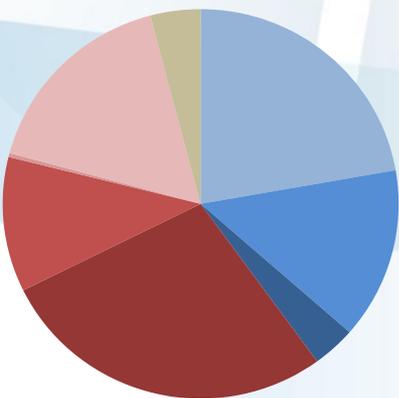
- ▲ 米国原子力: 平均および最小/最大 (1971年~1996年)
- 米国原子力: 単一原子炉 (範囲なし) (1971年~1996年)
- フランス原子力: 平均および最小/最大 (1977年~1999年)
- 洋上風力: すべてのEUプロジェクト価格 (1999年~2008年)
- ◆ デンマーク洋上風力: 平均コスト (1981年~2009年)
- 米国洋上風力: 容量加重平均価格 (1984年~2010年)
- 太陽光モジュール: 世界平均価格 (1975年~2007年)
- ◆ PV Siモジュール: 世界平均価格 (IPCC SRREN) (2003年~2010年)
- 米国PVシステム: 平均設置価格 +/- SD (1998年~2009年)
- スイス・ヒートポンプ: 7.6 kWユニットの平均コスト (1982年~2009年)
- ◇ スウェーデン・ヒートポンプ: 6.6~8.6 kWユニットの平均コスト (1994年~2008年)
- ブラジル・エタノール価格 (1975年~2011年)



投資ポートフォリオ 世界

持続可能性政策なし (2兆5,580億)

現在
(9,410億)

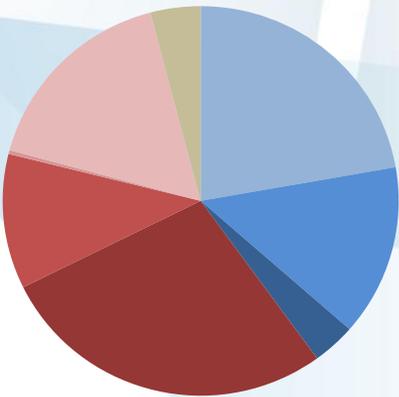


2005年～
2010年

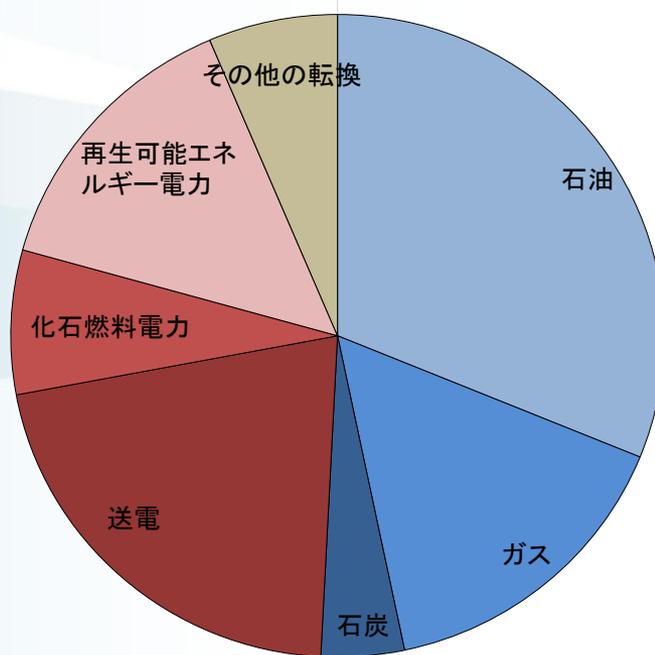
2050年

投資ポートフォリオ 世界

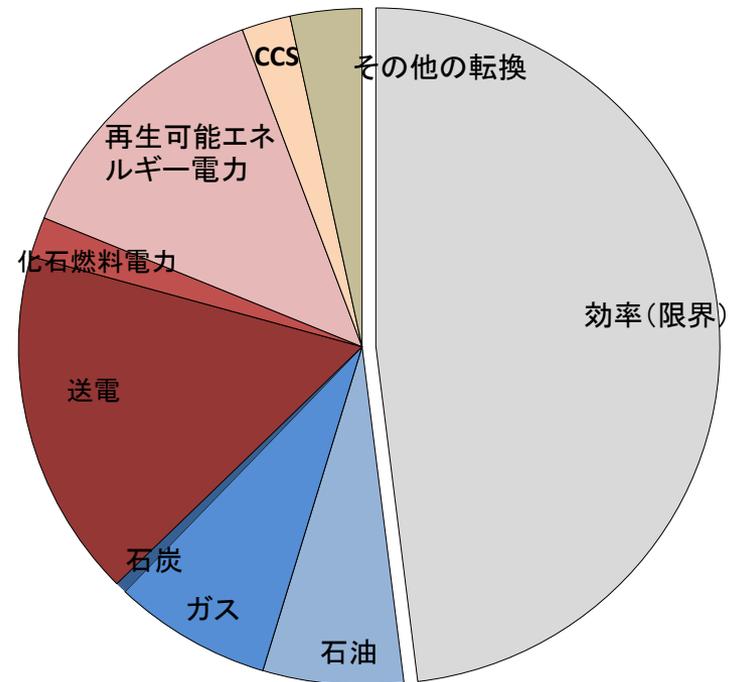
現在
(9,410億)



持続可能性政策なし
(2兆5,580億)



GEA—効率
(2兆8,490億)

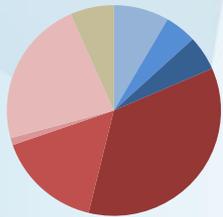


2005年～
2010年

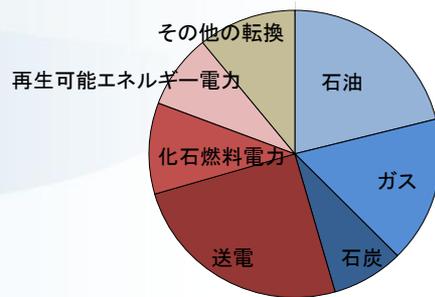
2050年

投資ポートフォリオ アジア太平洋

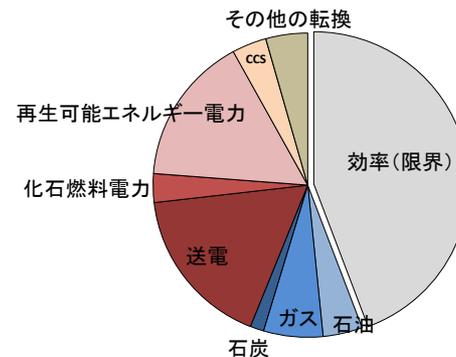
現在
(2,750億)



持続可能性政策なし
(5,160億)



GEA-効率
(5,790億)



2005年～
2010年

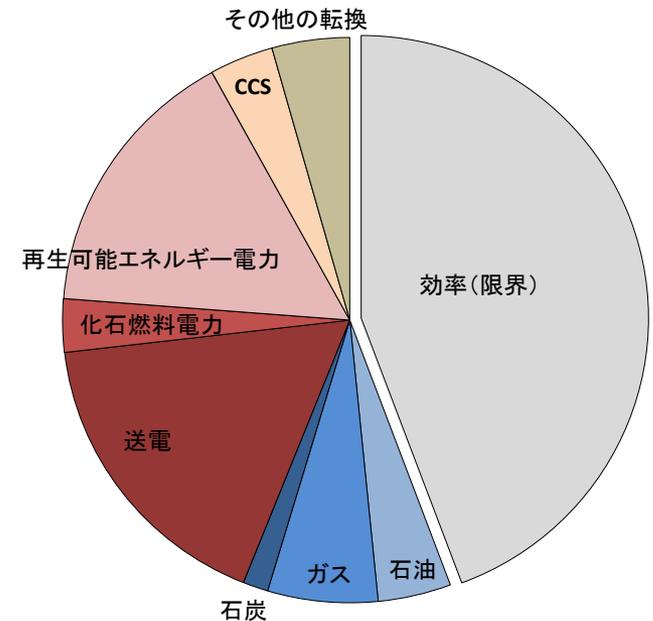
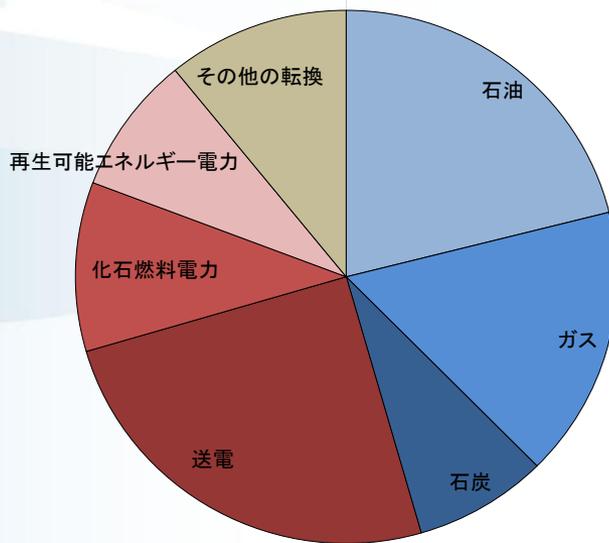
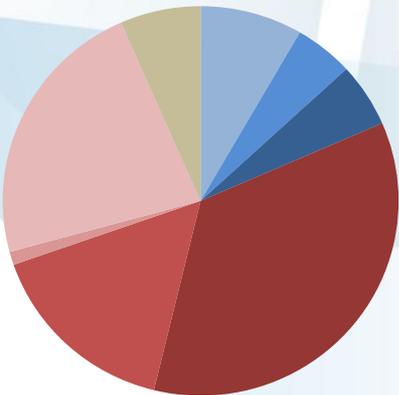
2050年

投資ポートフォリオ アジア太平洋

持続可能性政策なし
(5,160億)

GEA-効率
(5,790億)

現在
(2,750億)



2005年～
2010年

2050年

ステートメント：エネルギー事業は、持続可能な将来に向けたさらなる開発と変革のために中心的役割を果たす。こうした発展目標を達成するためには、RD&D（研究開発・実証）と投資を促進し、安定した規制メカニズムを構築することが重要である。



International Institute for
Applied Systems Analysis
www.iiasa.ac.at

ご清聴ありがとうございました



naki@iiasa.ac.at



IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis

science for global insight