

地球温暖化対策からみたエネルギー技術開発 －核融合のポテンシャルと現実－

内閣府原子力委員会 「核融合研究開発基本問題検討会(第3回)」

平成 15 年 7 月 10 日

時松宏治*

メッセージの趣旨

1. 核融合がなくても地球温暖化を抑制して 21 世紀を乗り切ることができる。
2. 技術オプションとして核融合を含む革新的な技術の研究開発を継続することは、不確実な将来に備えるために、可能性の芽を残す意味で必要である。
3. 核融合は将来のエネルギーと環境において、技術オプションとしての資格とポテンシャルを有する。
4. 他革新的技術との競合、エネルギーシステムの変化の時定数、技術習熟、波及効果、技術浸透など、核融合にとって厳しい条件が現実には存在する。
5. 「エネルギー技術開発」になると、核融合は厳しい競争にさらされる。社会に受容される核融合の研究開発体制が望まれる。

* 所属：(財)地球環境産業技術研究機構(RITE)研究員
なお、本プレゼンは個人的意見であり、所属組織の考えを表すものではありません。

地球温暖化と対策技術のシナリオ

1. 地球温暖化のシナリオ

IPCC は 1990 年、'92 年、2000 年の 3 回にわたり温室効果ガス等の将来排出シナリオを発表してきた。最新シナリオは「SRESシナリオ」と呼ばれている。SRESシナリオでは、「環境と経済」「グローバリズムと地域志向」という軸で、「将来世界は4つの発展パターンが考えられる」としている点である。

- Nakicenovic(eds) , “Special Report on Emissions Scenarios”, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

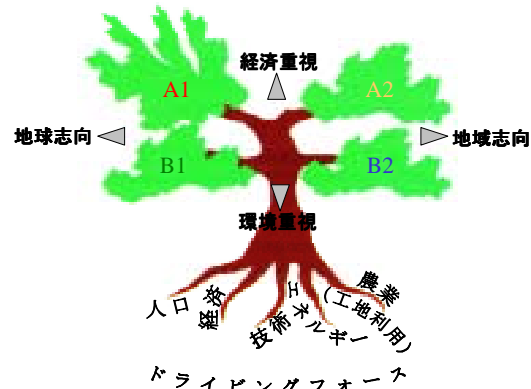


図1 SRESにおける排出シナリオのストーリーライン

2. 温暖化対策の“ロバストな”技術シナリオ

大規模で継続的なエネルギー効率向上と、植林は、異なる SRES 世界に共通する対策技術シナリオとしての特徴である。低炭素エネルギー、特に 21 世紀前半の天然ガス、21 世紀後半のバイオマスエネルギーの導入は、全てのシナリオに共通する特徴である。A1 世界や A2 世界では原子力あるいは炭素隔離技術が温室効果ガス濃度安定化に重要になってくるであろう。

- T. Morita et., al., “Overview of mitigation scenarios for global climate stabilization based on new IPCC SRES emission scenarios (SRES)”, *Environmental Economics and Policy Studies* 3 (2000) 65-88

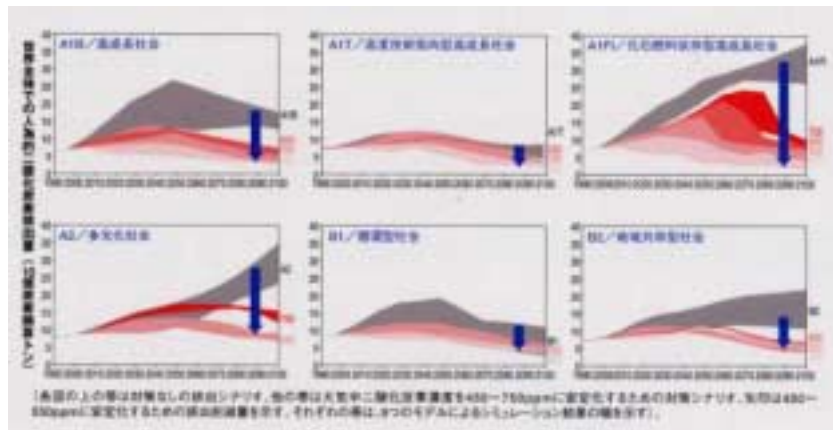


図2 各 SRES シナリオにおける温暖化抑制に必要な排出削減量

注：いずれの排出抑制シナリオにおいても核融合なしで温暖化を抑制して 21 世紀を乗り切っている。B1 や B2 シナリオでは原子力は不要である。核融合も他の技術オプションとの競合に大いにさらされるであろう。

【参考】対策技術のメニュー

温暖化の対策技術は、「CO₂の放出抑制」と、「大気中からの CO₂除去」に大別される。前者には、中分類として「省エネルギー」、「燃料転換(天然ガスへのシフト)」、「非化石エネルギーの開発」、「化石燃料からの炭素除去」、に分類される。原子力や核融合は、自然エネルギー、新エネルギーと並んで、「非化石エネルギーの開発」に位置付けられる。

地球温暖化防止技術の体系(CO₂対策技術)

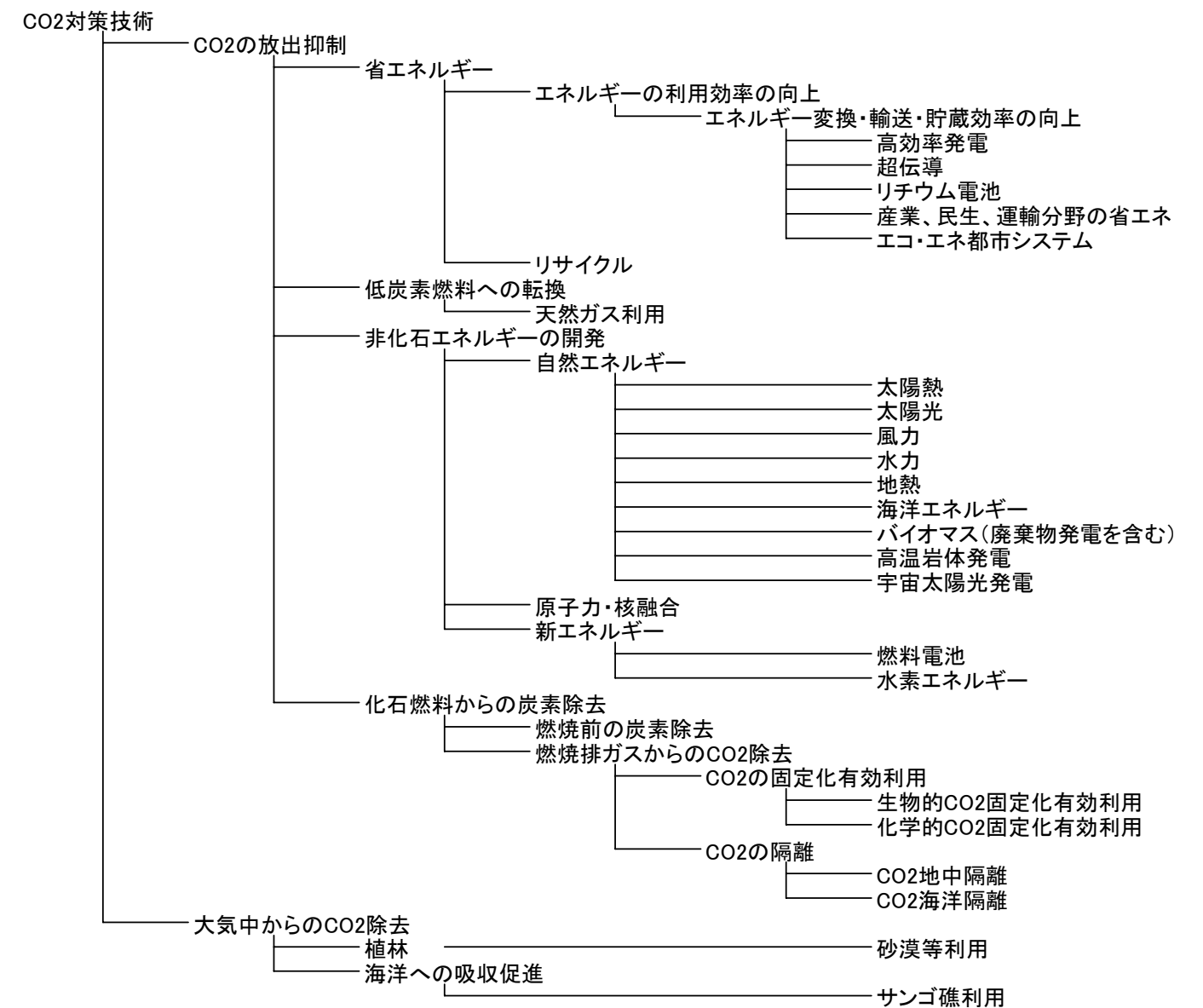


図3 温暖化の技術対策のメニュー

(出典：通産省環境立地局環境政策課編、「地球環境ビジョン」、(財)通商産業調査会、東京(1997))

将来の不確実性は存在する

3. 化石燃料資源量

安価な化石燃料は豊富に存在し、21 世紀の間もエネルギー供給の中心は引き続き化石燃料となる。Rogner による論文が、世界エネルギー会議 (World Energy Council : WEC) でオーソライズされ、化石燃料資源に対する現在主流の見方になっている。

- H-H. Rogner, “An assessment of world hydrocarbon resources”, *Annual Review of Energy and Environment* 2(1997)217-62

- Nakicenovic eds, “Global Energy Perspectives”, Cambridge Press, 1998.

表 1 世界全体の化石燃料資源量（単位：GTOE、出典：Rogner）

	Consumption		Reserves	Resources ^b	Resource base ^c	Additional occurrences
	1860 - 1994	1994				
Oil						
Conventional	103	3.21	150	145	295	
Unconventional	6	0.16	183	336	519	1,824
Natural gas						
Conventional	48	1.87	141	279	420	
Unconventional			192	258	450	387
Clathrates						18,759
Coal	134	2.16	1,003	2,397	3,400	2,846
Total fossil						
Occurrences	291	7.40	1,669	3,415	5,084	23,815

一方で、化石燃料の生産はまもなくピークを迎える、とする分析および文献も出されている (Bentley, “Global oil & gas depletion: an overview”, *Energy Policy* 30(2002)189-205. Deffeyes, Kenneth S., “Hubbert's peak”, *Princeton University Press*, 2001.)。ただし、Hubbert が考案した資源採掘の分析は、価格インセンティブによる資源開発や新技術開発の効果を内生的に含むものの明示的ではないため、受け容れない研究者も多く、主流にはなっていない。図 4 は Campbell (米国コロラド大学鉱山学部 M. King Hubbert center) による化石燃料供給予測。

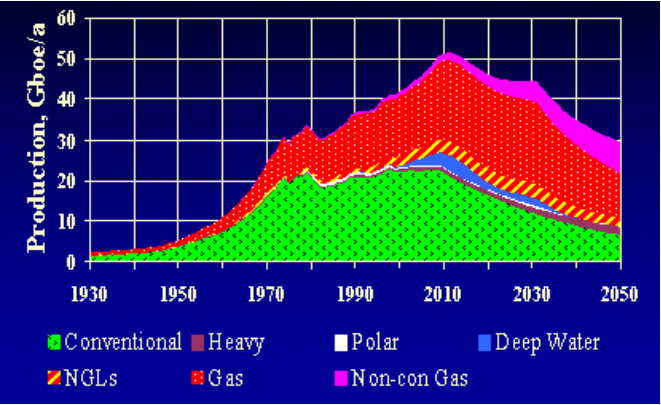


図 4 世界全体の化石燃料資源量（単位：GTOE、出典：Bentley）

4. 地球温暖化

1990 年～2100 年までの間に、地球の平均地上温度上昇の幅は、1.4℃～5.8℃である。気温変化による悪影響のリスクは気温変化の大きさとともに増大する。

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), “*Climate Change 2001-The Third Assessment Report of the IPCC*”, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

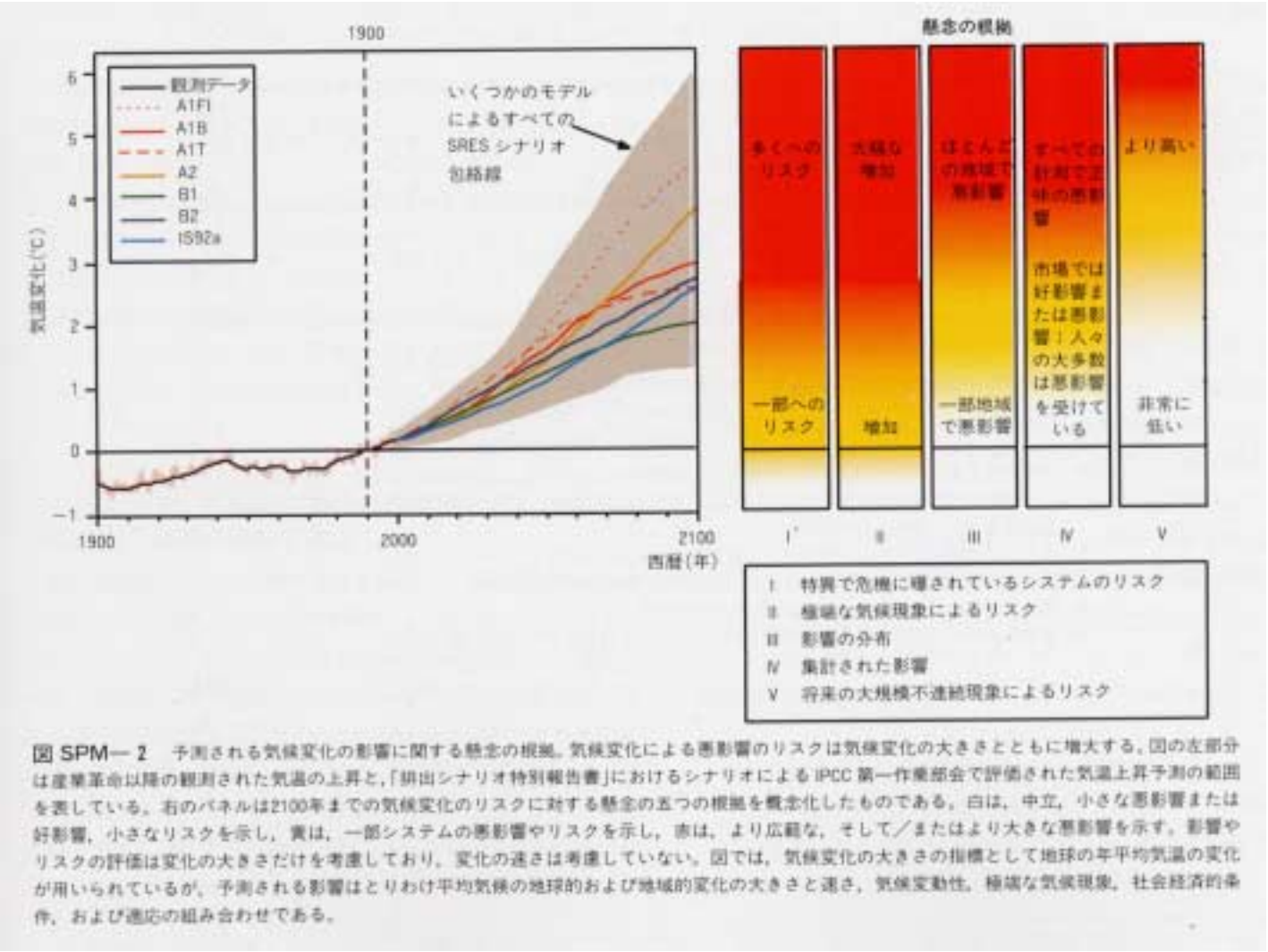


図 5 気温変化と影響に関する懸念（出典：IPCC2001）

一方で、地球温暖化に対して懐疑的な科学者も少なくない。Lomborg 著書はその 1 つの有名なものである (Lomborg, “*The Skeptical Environmentalist*”, Cambridge University Press, 2001.)。Lomborg 著書では温暖化に限らず環境問題全般に対して指摘している。温暖化については、エアロゾルの冷却効果、水蒸発の影響、雲の影響によっては、温暖化を過大評価している可能性を指摘している。

核融合は将来のエネルギー・環境技術としての 資格とポテンシャルを有している

5. 資格（ライフサイクル分析）

トカマク型核融合炉の建設・運転に伴う CO₂ 排出は軽水炉同等に小さい。

- K.Tokimatsu, et al., “Energy analysis and carbon dioxide emission of Tokamak fusion power reactors”, *Fusion Engineering and Design* **48**(2000) 483-498

- 内山洋司、「発電システムのライフサイクル分析」、電力中央研究所報告 Y94009、平成 7 年 3 月

表 2 発電技術のライフサイクル分析結果の比較(内山、Tokimatsu2000 より作成)

	核融合炉			在来型 軽水炉	石炭 火力	LNG 火力	水力	太陽 電池
	ITER-EDA ref.	先進的 (RS 型)	革新的 (ST 型)					
エネルギー比 (利得)	12	28	32	24	17	6	50	9
CO ₂ 排出量原単位 [g-CO ₂ /kWh]	43.9	22.5	22.2	20.9	990	653	17.6	58.7

6. ポテンシャル（エネルギー・環境モデル分析）

トカマク型核融合炉の炉設計コストデータに基づき、将来のコスト低減見通しと、初期装荷トリチウムの制約も考慮した設備容量見通しをもとに、核融合の参入コスト条件を調査した。その結果、現在設計がなされているトカマク型核融合動力炉は 550ppm 温暖化制約下で 2050 年から参入可能性があり、その場合 2100 年時点での発電シェアは約 20～30%となるポテンシャルを有する。またこれに伴い、エネルギー供給コストや温暖化制約下での“理論上の炭素税”(シャドープライス)低減効果も期待される。ただし、核融合の導入が遅れば遅れるほど、21 世紀での核融合の“役割”は小さくなる。

- K.Tokimatsu et al., “Role of nuclear fusion in future energy systems and the environment under future uncertainties”, *Energy Policy* **31**(2003) 775-797

解析の前提

コスト低減効果(運転習熟と技術習熟)

- a 参照トカマク炉(120 万 kW 級@導入開始時点・25 年後、170 万 kW 級@50 年後)
- b 運転習熟
- 設備利用率の向上(60%@導入開始時点 78%@25 年後 83%@50 年後)
 - 運転経費率の低下(4%@導入開始時点 2%@25 年後以降)
- c 技術習熟(導入開始後 25 年時点で、導入時点の建設費の低減を 20%と見込んだ)
- 設備容量上限制約(トリチウム増殖、世界全体で 100GW/yr の導入ペース)
- “他革新的技術”との競合はない(革新的技術のシェアを外生的に与えている)

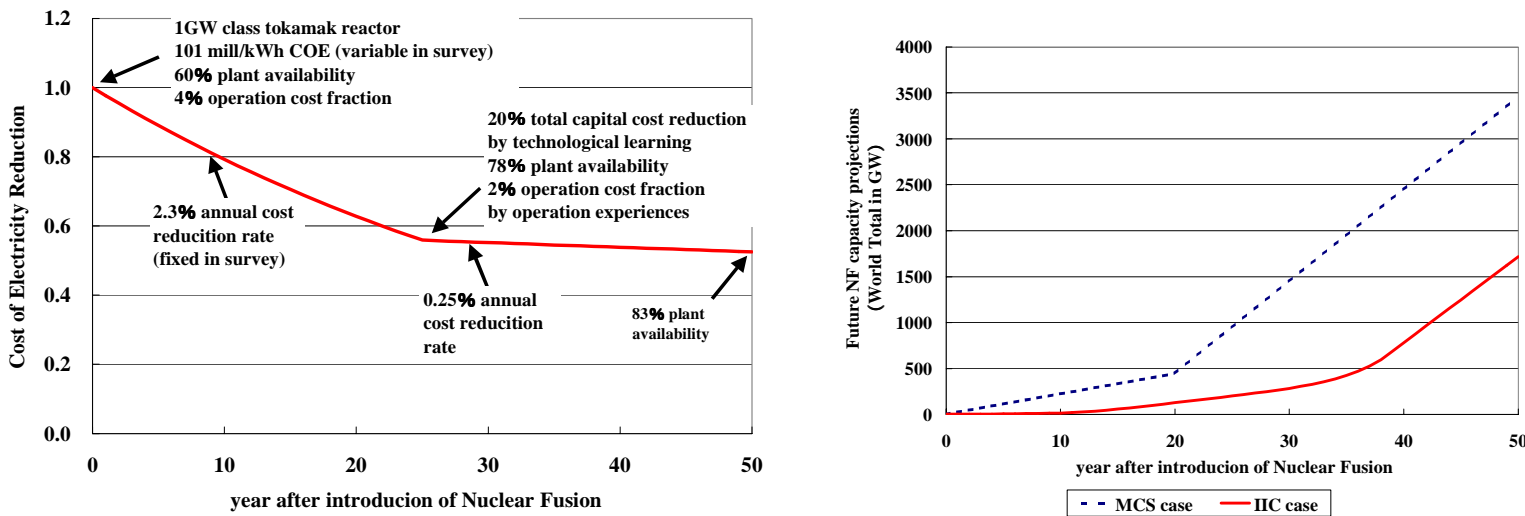


図 6 核融合の参入条件解析の前提条件（左：コスト、右：設備容量）（出典：Tokimatsu2003）

解析結果（SRES A1 および B1、IS92a シナリオ）

核融合が経済的に参入可能な条件は、温暖化制約無しでは参入できず、550ppm 制約下で参入可能性がある。2050 年に核融合が参入した場合、2100 年時点で発電シェアの 20～30%を占める可能性を有する。

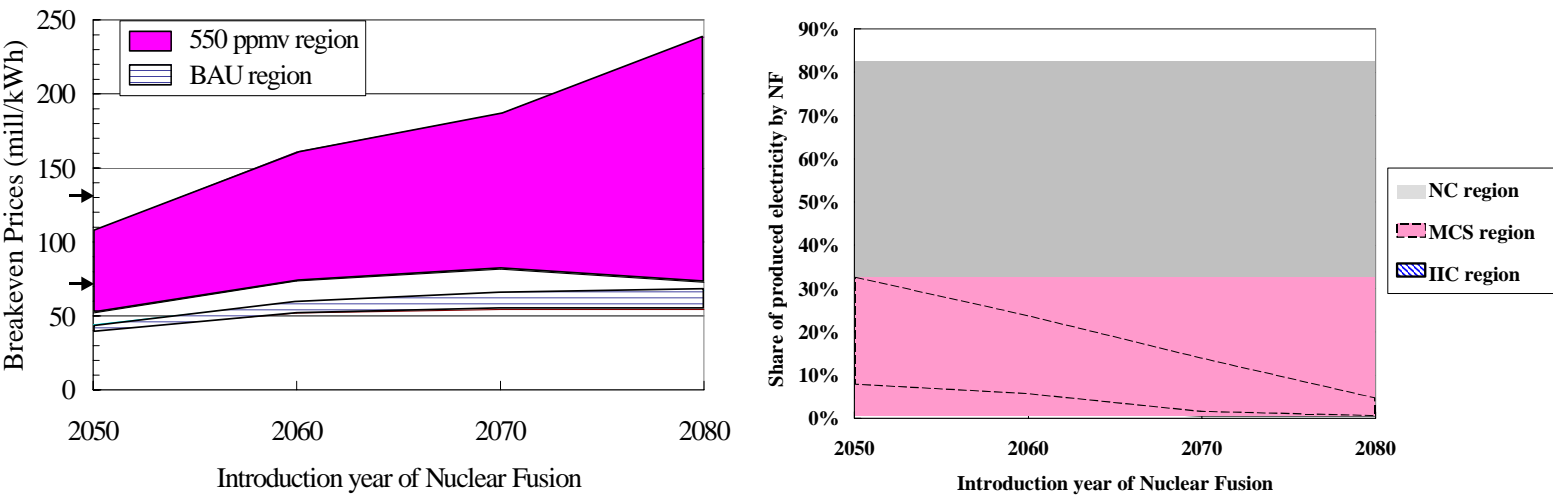


図 7 核融合の参入条件（左）および参入時の 2100 年時点の発電シェア（右）（出典：Tokimatsu2003）

注 1（図 7 左）：例えば“550ppm region”は各導入時点での核融合の参入コスト条件の包絡線を示している。幅は核融合の導入シナリオ・エネルギー需要シナリオの不確実性による。今回の解析条件では、各領域の下限ラインよりも核融合の発電コストが安ければ参入可能、上限ラインよりも高ければ参入不可能。図中矢印は現在設計されているトカマク炉の発電コストの上下限を示す。

注 2（図 7 右）：青斜線領域（IIC）は初期装荷トリチウムによる制約を考慮した場合の発電シェア（最も保守的）。赤領域（MCS）は初期装荷トリチウムの制約がなく導入ペースの制約のみ（物理的技術的可能性あり）。グレー（NC）は無制約（現実的ではない、参考値）。

核融合ポテンシャルを現実のものにするには、厳しい条件が存在する

7. 他革新的技術との競合

海水ウラン、核燃料サイクル・FBR、宇宙太陽光発電などが 21 世紀後半に参入する可能性がある。
- RITE/NEDO、『「地球再生計画」の実施計画作成に関する調査事業』(H14 年度報告書 51402009-0 平成 14 年 3 月)

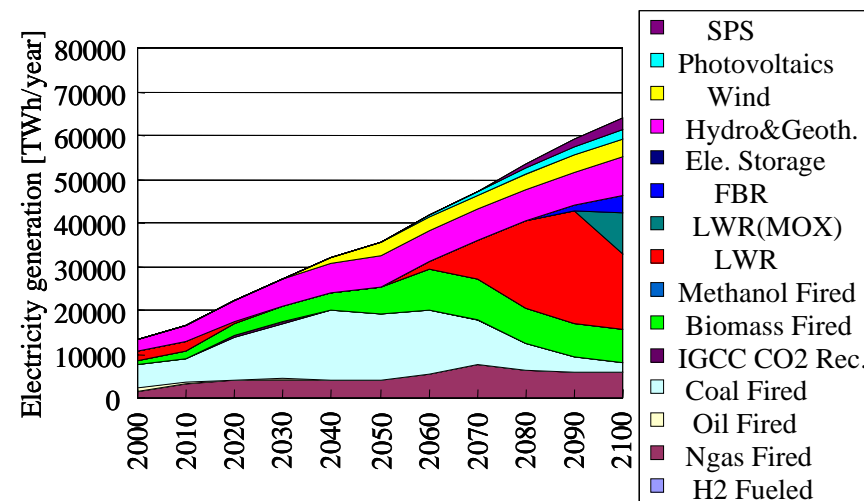


図 8 各種革新的技術（核融合は含まない）を明示的にモデル化した場合の発電プロファイル
注：核融合は、他革新的技術との経済的競合性を持たねば“割り込む”ことが出来ない恐れがある。

8. 技術習熟効果

エネルギー技術では技術習熟効果が観測されている。太陽光発電や風力発電はガスタービンと比較してコストは高いものの、ガスタービン同様に技術習熟効果が期待される。

- Andrii Gritsevskiy, Nebojsa Nakicenovic, “Modeling uncertainty of induced technological change”, *Energy Policy* 28(2000)907-921

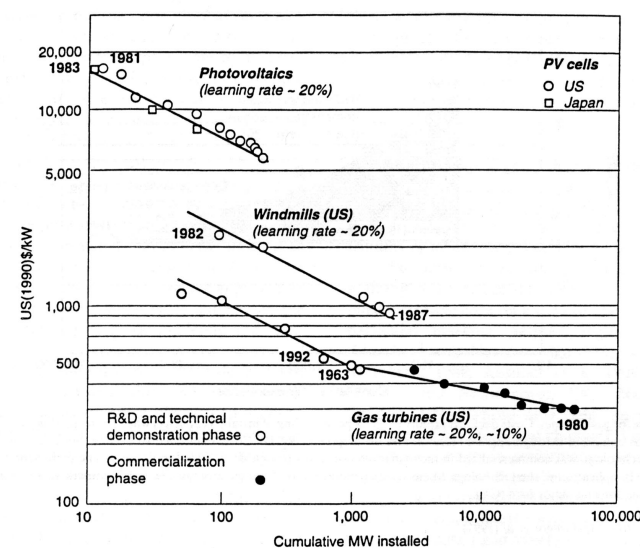


図 9 3つの異なる発電技術 - ガスタービン、風力、太陽光の習熟曲線
(グラフは縦横軸ともログスケール。横軸は累積容量、縦軸は建設単価)

注：出力重量密度が小さい核融合は小型分散技術と比較して、技術習熟効果が期待しにくい。

9. エネルギーシステムの変化の時定数

エネルギーシステムにおける変化は数十年かかる、基本的に極めてゆっくりしたペースである。

- A.Grubler, N.Nakicenovic, D.Victor, “Dynamics of energy technologies and global Change”, *Energy Policy* 27 (1999) 247-280

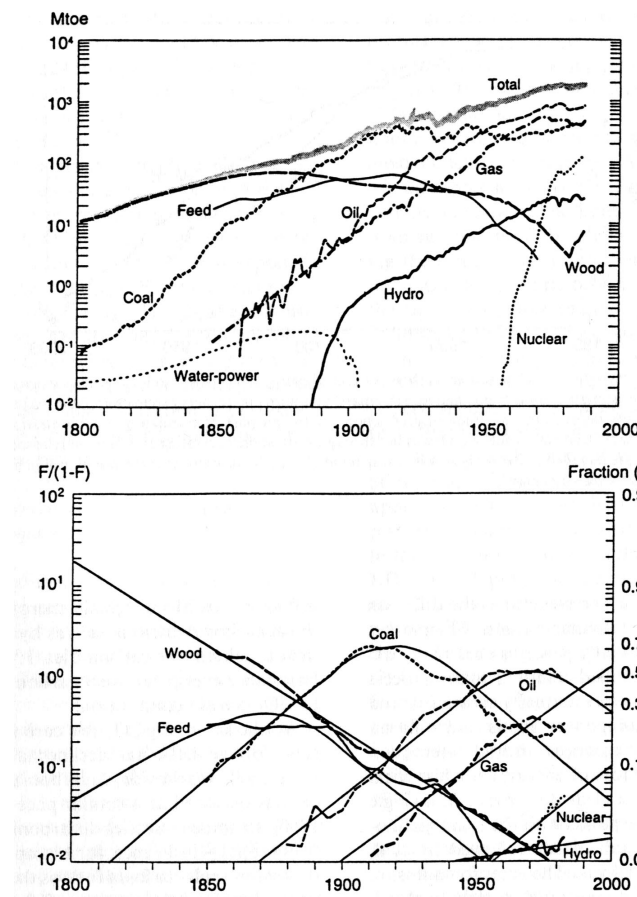


図 10 米国における一次エネルギー供給（上図：MTOE 単位）、
供給シェア F によるロジスティック曲線を用いたフィッティング（下図）
注：軽水炉でも 40 年かかり、一次エネルギー供給の 1 割弱（発電シェアで 2 割弱）を占めるようになった。

10. 革新的技術に対するポテンシャル論 vs 現実論 の論争

- ・ ポテンシャル論: 革新的技術[†]が CO₂ 濃度安定化に寄与する。広範な徹底した研究開発が焦眉。
- M.I.Hoffert et al., “Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet”, *Science* 298(2002)981-986
- ・ 現実論: 技術の実現から市場への浸透には 50 年かかるため、濃度安定化には遅すぎる。
- B.O'Neill et al., “Planning for Future Energy Resources”, *Science* 300(2003)581-584

[†] 宇宙太陽光発電、核融合、核分裂-核融合ハイブリッド炉、CO₂ 隔離、超電導グローバルネットワーク、ジオエンジニアリングなどが挙げられている。

「エネルギー技術開発」として、社会に受容される 核融合の研究開発体制が望まれる。

11. 新エネルギー技術の研究開発

- ・ 太陽光
- ・ 燃料電池: PAFC、MCFC、SOFC、PEFC
- ・ 超電導電力応用技術: 発電機、変圧器、ケーブル、電力貯蔵 (SMES)、フライホイール

表 3 新エネルギー技術と核融合

	超電導電力応用	燃料電池	太陽光発電	核融合
基礎原理の発見	1911 年	1839 年	1954 年	1932 年
R&D 開始	1986 年頃	1974 年	1974 年	1950 年頃
提供サービス	電力の発生、変換、 輸送、貯蔵	電力、熱、動力	主に電力 (主にピーク時)	主に電力 (主にベース)
利用形態	電力系統	小中規模定置利用 自動車	主に分散電源	大規模集中
実用化可能時期	2011 年～2020 年	一部実用化	実用化 (普及段階)	2050 年?

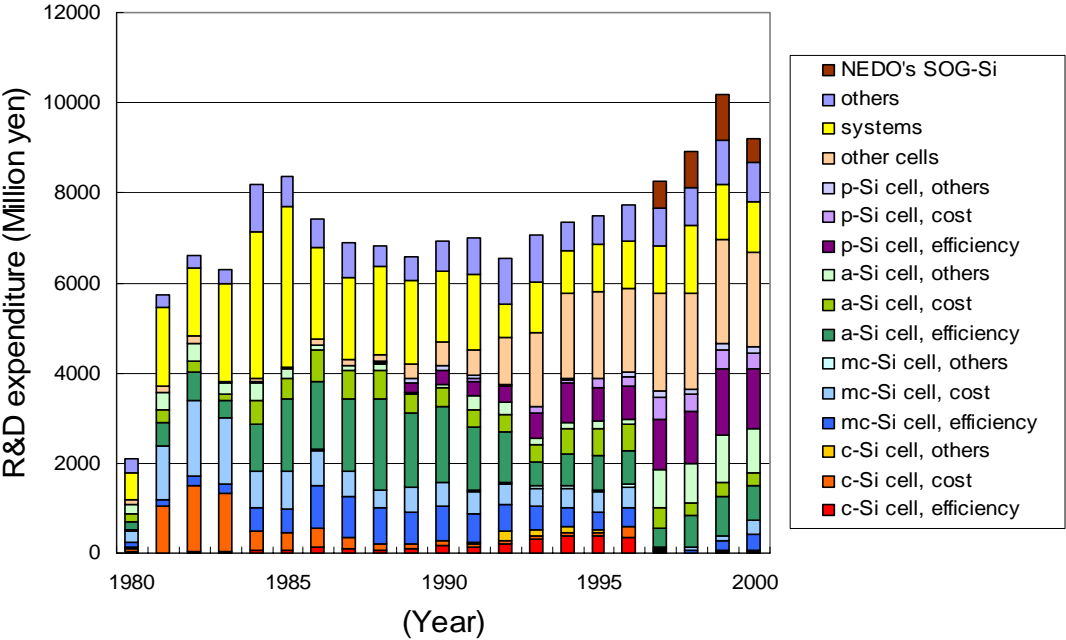


図 11 (ニュー) サンシャイン計画における太陽光発電の研究開発費の推計値

出典：遠藤栄一、田村佳彦、「太陽電池の研究開発に関する費用効果分析」
電気学会論文誌 B、Vol. 121-B, No.11, 1472-1482 (2001)

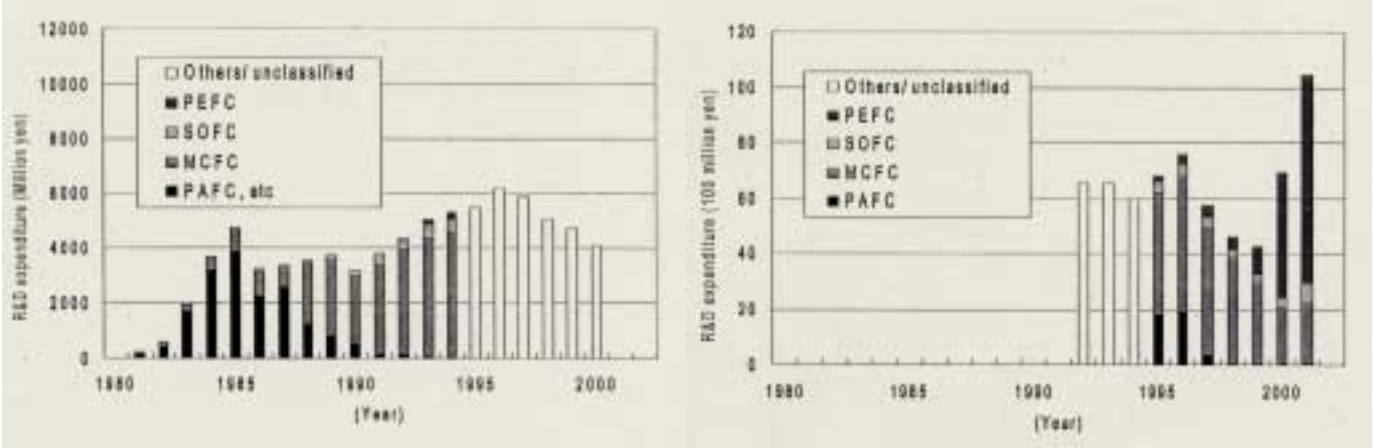


図 12 ムーンライト・ニューサンシャイン計画における燃料電池の研究開発費の推計値
(左：工業技術院、右：NEDO)

出典：遠藤栄一、「費用効果分析のための燃料電池研究開発に関する考察」<http://staff.aist.go.jp/endo.e/14denB2.pdf>

12. 核融合開発の難しさ

- ・ 通常のトカマク型は、高額な ITER に投資しないと物理・工学ともに前進しない。
- ・ コンコルドの例：
(速度メリットがあっても、技術困難度・研究開発費が高く、経済的競争力が無ければ市場は選択しない)
- ・ 核分裂炉 (軽水炉、LMFBR など) の研究開発の歴史などを紐解くと参考になる？
- ・ 将来の“価値”は割り引かれる (割引率)。

13. 「エネルギー技術開発」として受容される核融合になるためには？

- ① “世間感覚”で議論できるための、詳細な設計、システム、シナリオ作りが必要。
フロントエンドからバックエンドまで、周辺設備を含む、軽水炉並に詳細な物量、コスト、シナリオ。
- ② 現実的な開発のロードマップが必要 (2030 年までに約束できること、2050 年までに約束できること)。
 - ・ “責任を持っている”と理解されるのは 2030 年まで
 - ・ エネルギー取出しまでのシナリオ、実用化までのシナリオ
- ③ メリハリのある予算配分 (エネルギー開発、学術・科学) を、『核融合コミュニティ側』から提示
 - ・ 核融合コミュニティに必要な“覚悟”と“コンセンサス”
 - ・ 核融合の“Early action vs Delay action”
(早期開発により 21 世紀の貢献を目指すか？ vs 科学的知見が蓄積するまで時期を待つか？)
- ④ “途上国参加” (大規模ベース電源の将来の有望市場！) と“電力に限らないサービス”が望まれる。

以上