

核融合研究開発の意義と投資対効果

核融合専門部会
第7回核融合研究開発基本問題検討会

平成15年8月12日
京都大学エネルギー理工学研究所
小西哲之

内容

1. はじめに

基本的な考え方
本検討会の視点に沿った考察
原子力長計・第三段階の観点から

2. エネルギー研究開発の投資と経済的效果

投資の構造
投資効果の構造
外部性

3. 核融合エネルギーの未来像の検討

未来のエネルギー状況
核融合の特徴と導入上予想される困難
核融合の未来市場の可能性
社会適合性の観点で考える核融合の
利用法
安全性の観点で見た核融合の
市場性

4. 経済効果

過去、現在および近未来の技術波及分
未来の核融合の経済規模
核融合の経済価値のまとめ

5. まとめ—核融合の意義と開発戦略

投資効果の観点からみた核融合の
導入シナリオ
セキュリティ
開発上の新たな課題

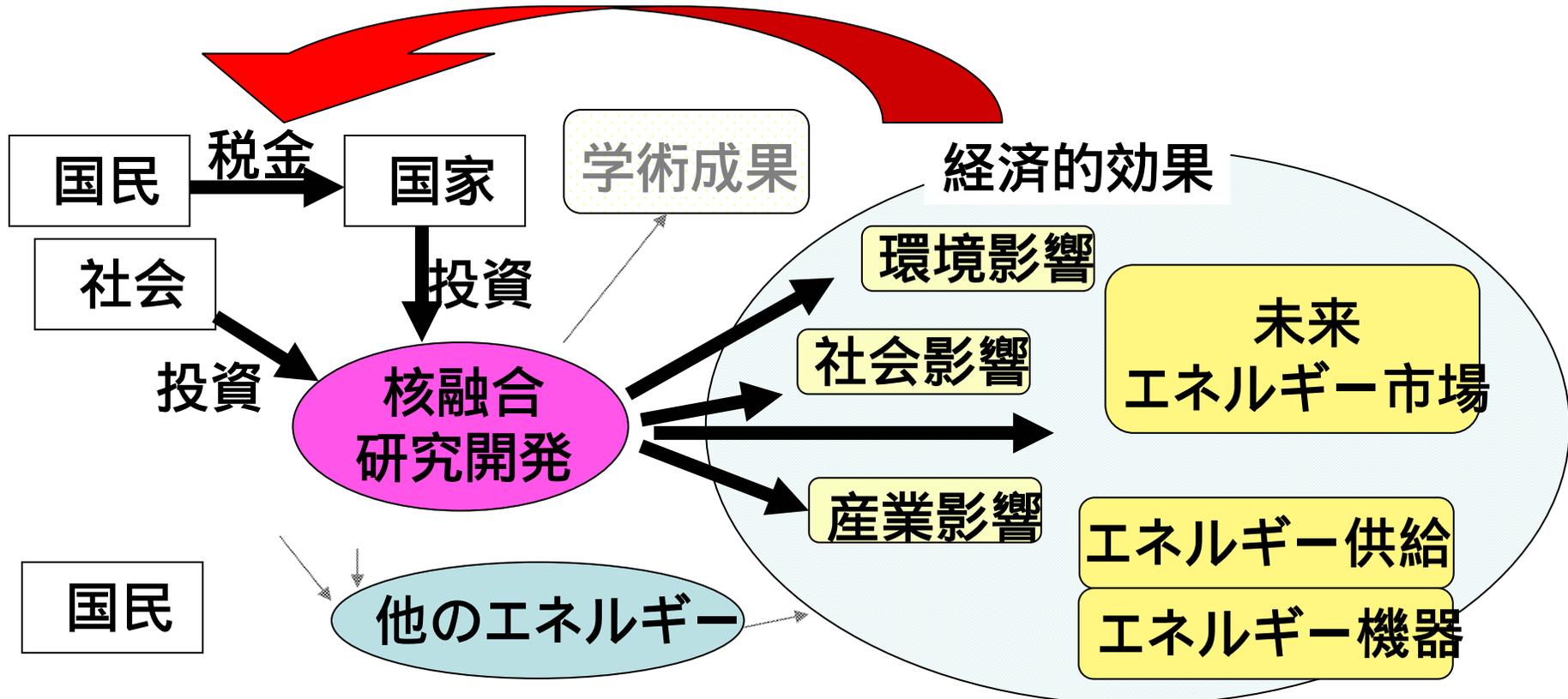
6. 補論 — 第三段階の見直しの必要性

核融合の位置づけの変化
加速計画

1. はじめに

・ 基本的な考え方

- ・ 全ての研究開発は「投資対効果 = Value for Money」の観点から評価される。
 - 全てのエネルギー技術は未来社会の視点で公平に評価される。
 - 「効果」は金銭価値のみで評価するとしても、市場価値が全てではない。
 - エネルギー供給は、社会へ、産業、環境に市場以外を通じても影響する。
- 適正な投資額とスケジュールが将来社会への影響力から評価可能。

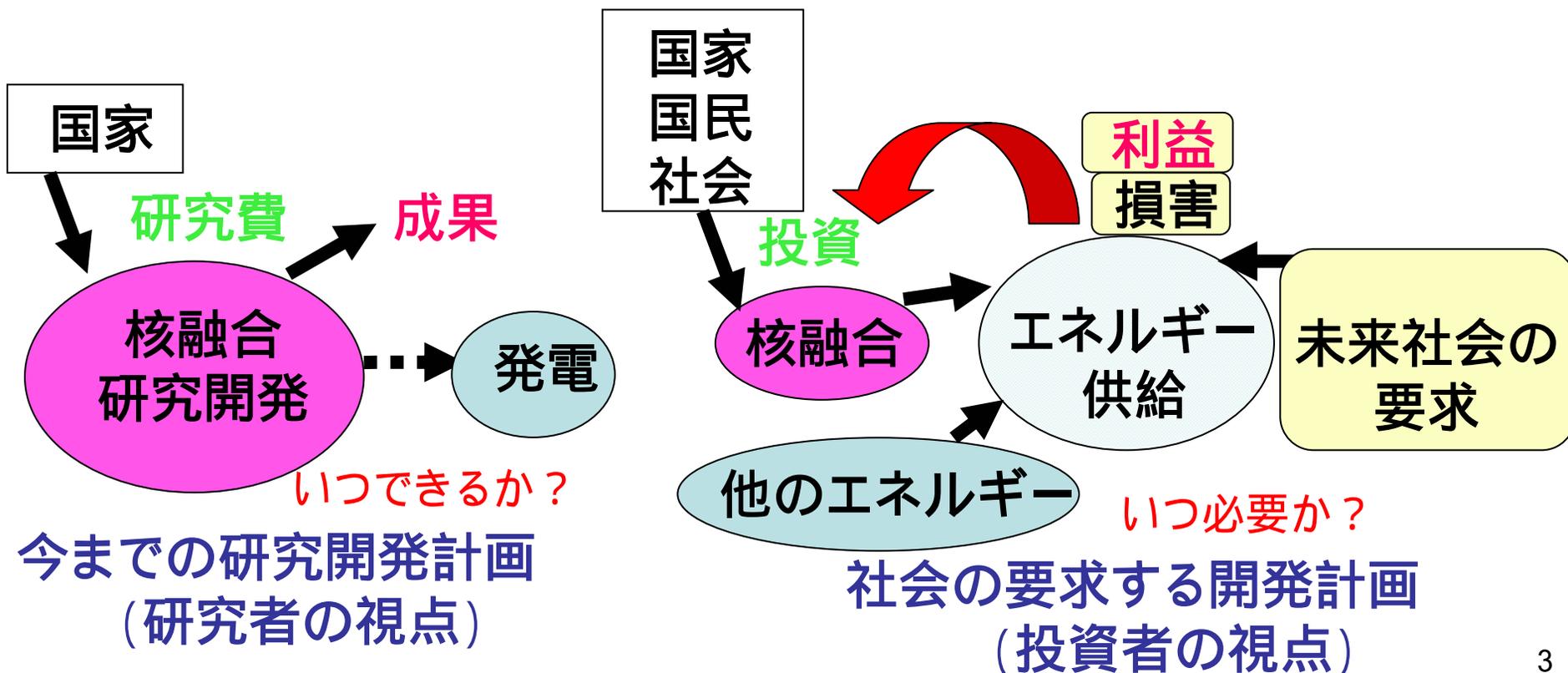


・本検討会の視点に沿った考察

(未来社会の求めるエネルギーとしての核融合開発)

- ・核融合研究開発の意義を「投資対効果」の観点から評価する。
- ・核融合の将来像を、この「効果」を最大限にするものとして構想する。
- ・核融合の未来のエネルギー源としての特徴と意義付けを考察する。
- ・核融合の社会と環境に対する正負のインパクトを評価する。

以上の方法論は全ての未来エネルギー技術評価に適用可能。



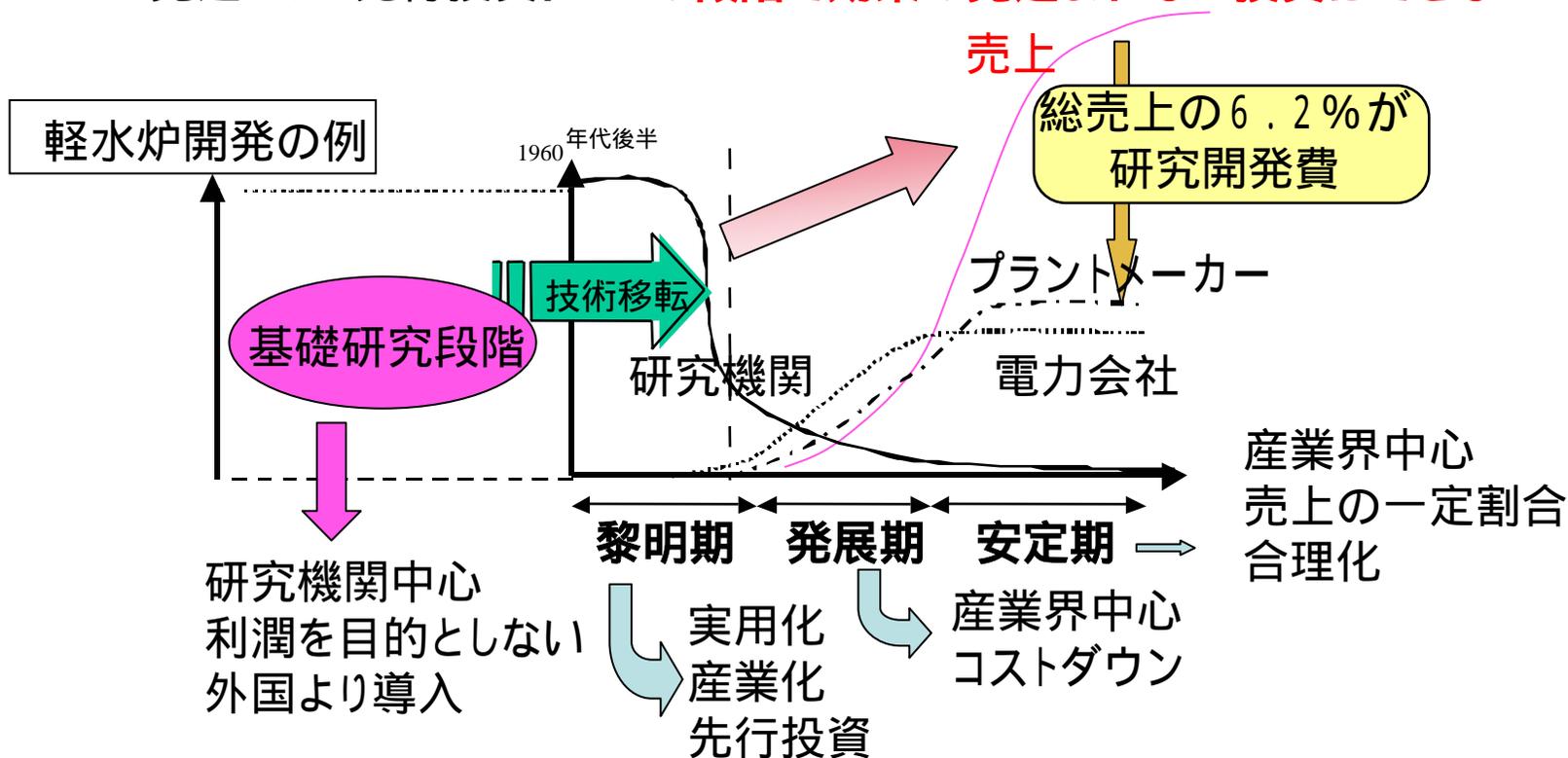
原子力長計の観点、第三段階の観点から

- ・原子力エネルギー研究開発の意義を必ずしも「投資対効果」に求めていない(?)
 - 「国策」としての原子力
 - 核融合はまだ基礎研究段階
- ・核融合はエネルギーとして扱われていない
 - 原子力エネルギーを未来市場で位置づけていない
 - 高速増殖炉も2030以降のオプション
 - それぞれのエネルギー源の比較は行われていない。
- ・エネルギー開発としてのスケジュールを示していない
 - 国のエネルギー政策は高々20年まで
 - 実用化までの筋道は不明
- ・現在の長計は社会の要求の視点を取り入れている
 - 第三段階は長計より古い。
- ・エネルギー資源、環境の見方が変わってきている。
 - もはや「枯渇」は言われていない
 - 地球環境問題の視点

2. エネルギー研究開発の投資と経済的効果

投資の構造

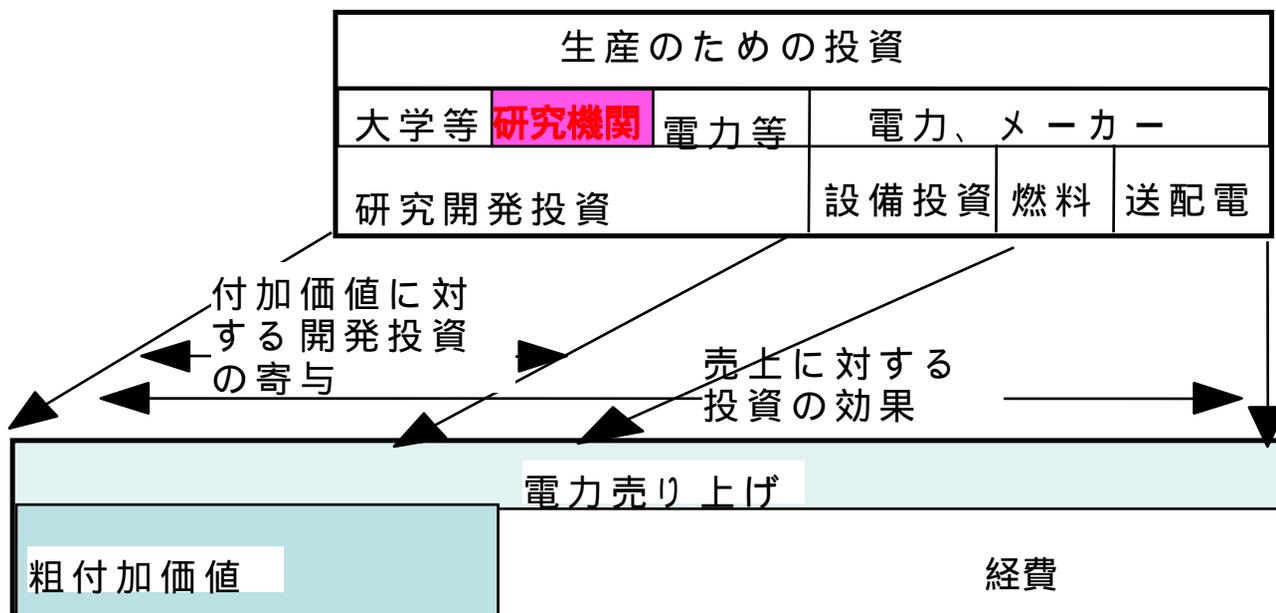
- ・複数の異なる性格、異なる目的の投資者が同一の技術に投資する。
(例えば、国家、研究機関、企業、一般投資家など)
- ・投資者により投資時期のプロファイルがことなる。基礎研究開発投資は早く、応用投資は遅い。
- ・産業化した技術では売上の一定額が投資される。それ以前は、将来の利益を見込んだ「先行投資」 **この段階で効果の見込まれない投資はできない**



投資の構造 - 2

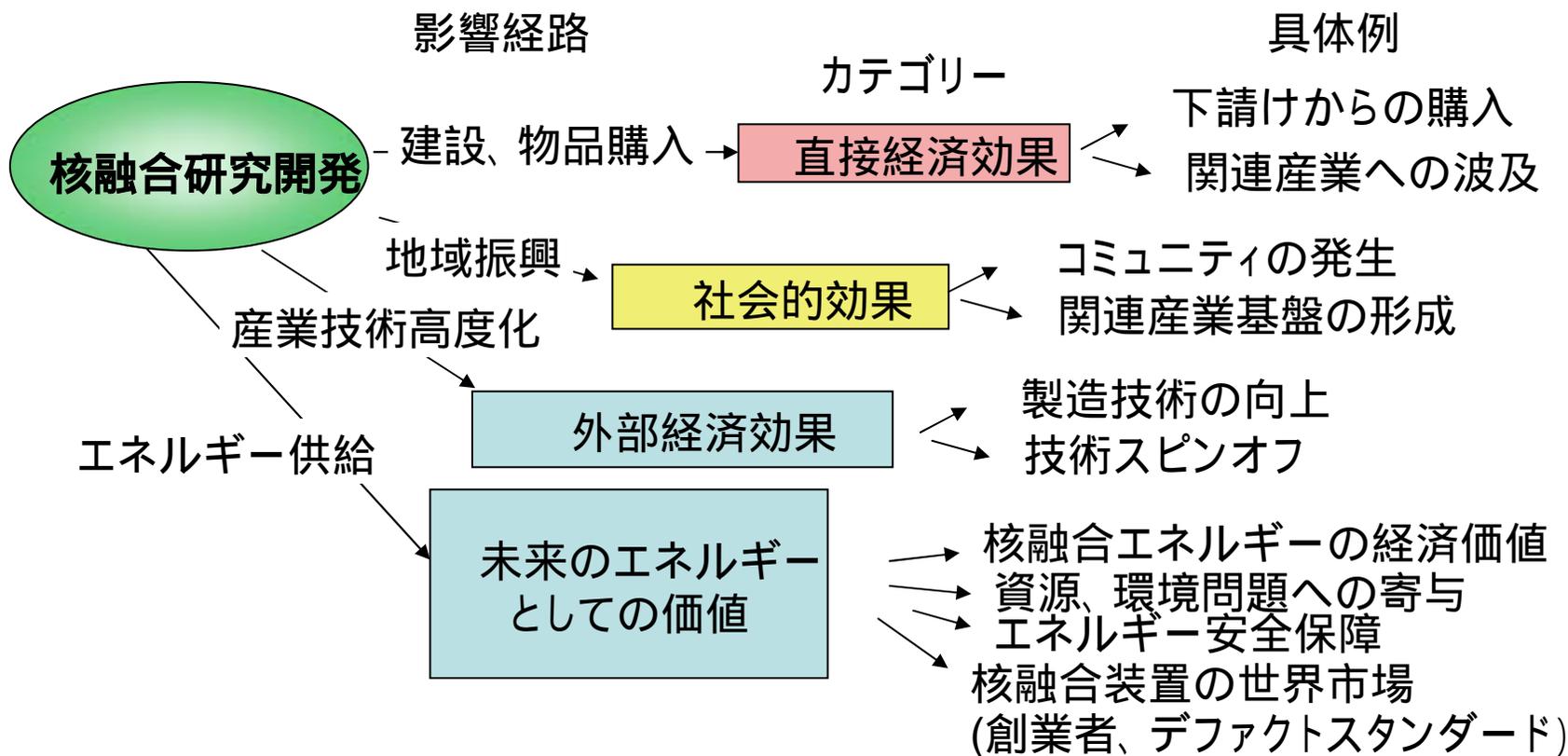
研究投資は、多くの業種で売上の5～10%。高付加価値製品で15%まで。

- ・生産のための投資は、研究開発と設備 / 生産活動に対して行われる。
- ・投資により得られる影響、利益は、投資全体の効果
 - 個々の投資に対する費用対効果は、投資者の貢献割合により分配される。
- ・研究開発投資は、売上(粗利益)の一部により回収される。



投資効果の構造

- エネルギー研究開発投資は、技術成果によって社会に以下の経済的インパクトを与える。
- 研究開発そのものの創出するGDP
 - 社会的効果：間接的市場創出経済波及、雇用創出
 - 外部経済効果：産業技術力向上、産業技術スピノフ、(バックストップ、セキュリティ)
 - 未来エネルギー市場：直接「市場創出効果」— 電力、発電機器の売り上げ
エネルギー支出の減少

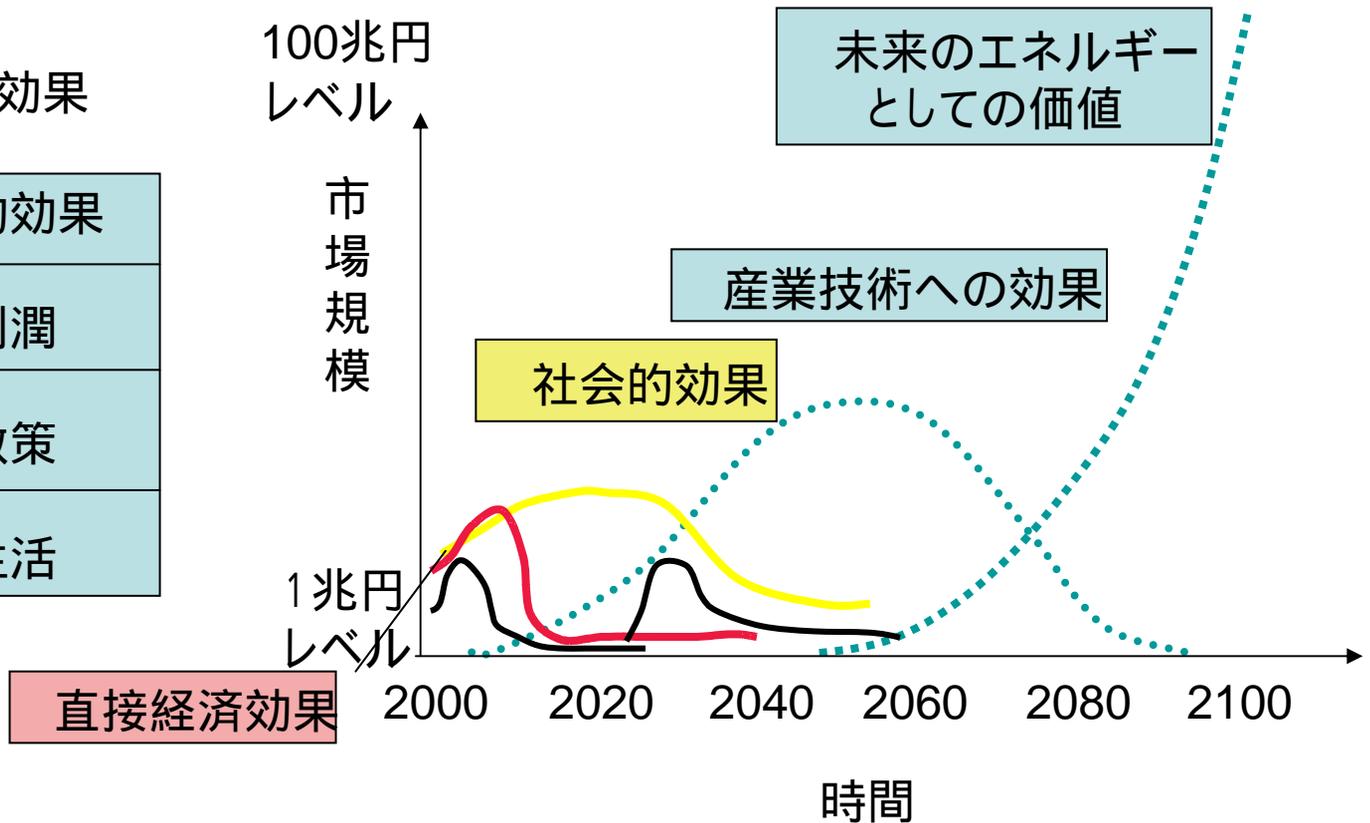


- ・経済効果は発生時定数、規模、受益者が異なる。
- ・全ての価値は「割引率」などにより現在価値に換算できる。(長期では2%が一般的)
- ・遠い未来ほど不利に働く要素がある。

- 金利
 - 貨幣価値変動
 - 投資の成功確率
 - 時間選好
- 投資者と目的効果

投資者	目的効果
企業	利潤
国家	政策
国民	生活

核融合研究の経済効果の時間プロフィール



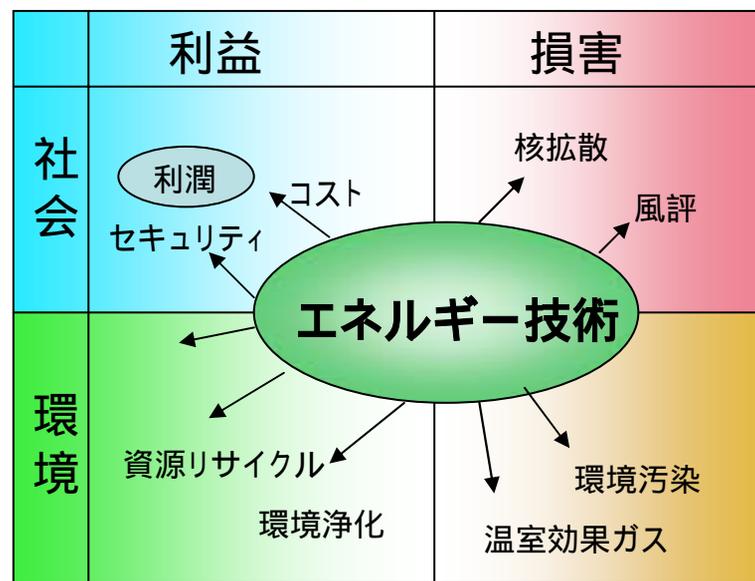
外部性(外部経済性)

・エネルギー技術は、社会での運用において様々な経済価値換算可能な影響を生む。

「外部性」(外部経済性) - 市場を介さない経済的影響

- 負の環境影響: 環境汚染・環境破壊、健康被害。温室効果ガス。
- 正の環境影響: 環境浄化、緑化。温室効果ガス削減。廃棄物処理。
- 負の社会影響: 社会の非受容。風評被害。災害リスク。核拡散、軍事利用、テロ。
- 正の社会影響: エネルギーセキュリティ。バックストップ。社会インフラ・生産力・技術力。災害防止効果。

- ・エネルギー技術が社会に与える利益と損害は、すべての効果の総和で評価すべき。
- ・投資者が国家であれば、国家の機能としての政策における効果で評価すべき。
- ・市場における売り上げはその経済影響の一部にすぎない。
- ・発電コストは市場選択の(一つの)指標になるが、社会的選択の指標にならない。
ただし、エネルギー技術の影響はエネルギー供給市場での影響力に相関する。

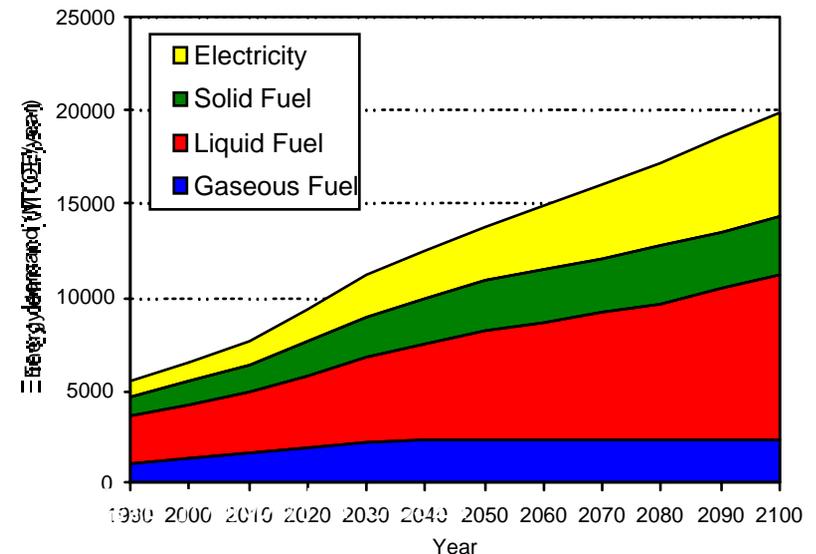
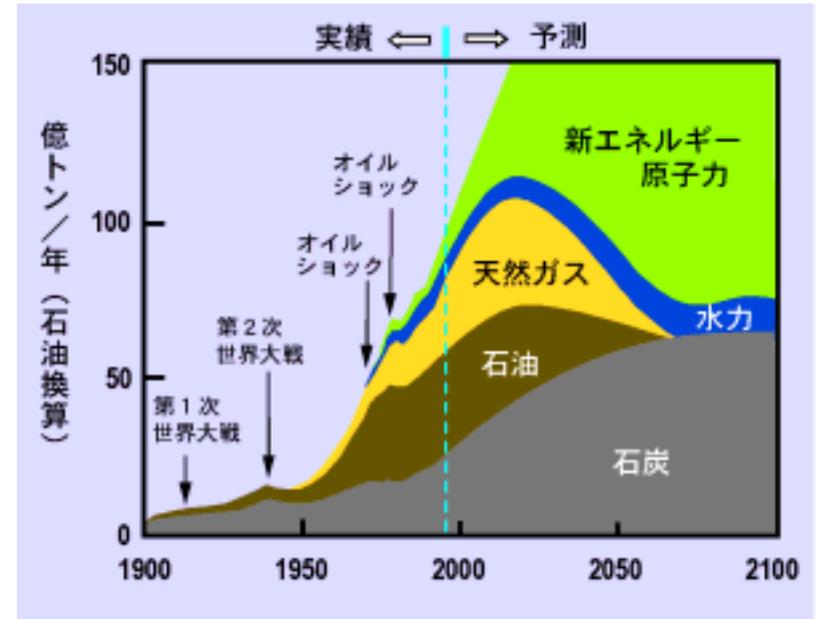


2. 核融合エネルギーの未来像の検討

—核融合エネルギーの利用価値の最大化、利用に伴うリスクの最小化は、それぞれ第三段階基本計画において「炉設計」「安全性」で課題化されている

未来のエネルギー状況

- ・需要は増大。ただし中心は発展途上国の人口増と経済開発
- ・分散化が進む。途上国ではインフラ未整備のままに需要増大。
- ・燃料の脱炭素化。合成燃料の普及。特に水素。燃料需要は電力の4倍。
- ・資源制約：枯渇はしないが高騰、低品位化。偏在、質、技術 - セキュリティの問題
- ・核拡散は深刻化。
- ・原子力の社会的受容、安全性理解に課題。

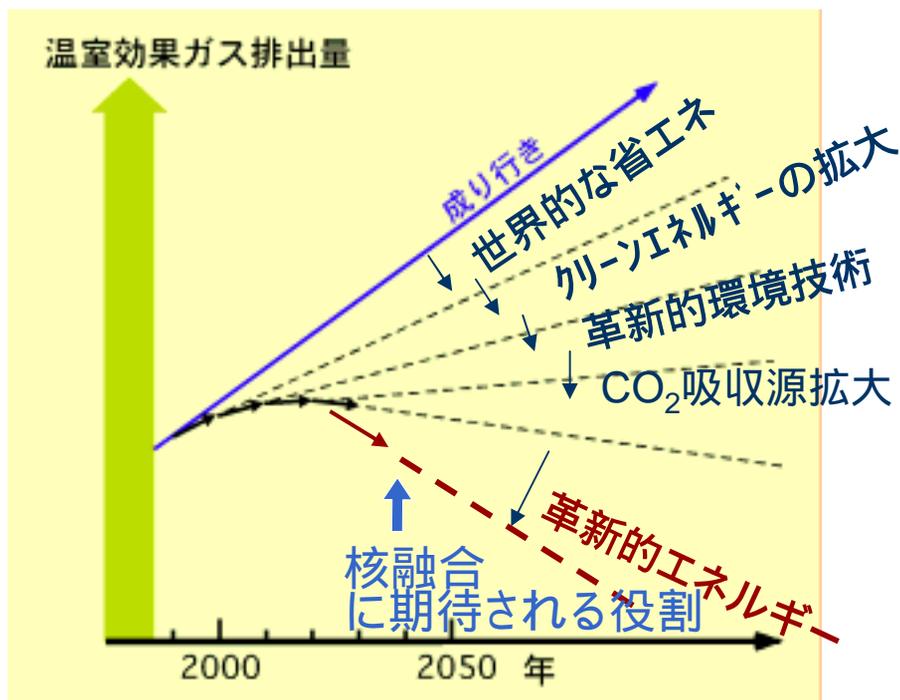


‘将来の地球環境問題

2100年には7倍のエネルギーで二酸化炭素は現在以下
環境対策の重視。炭素税。(BAUとのシナリオ選択)

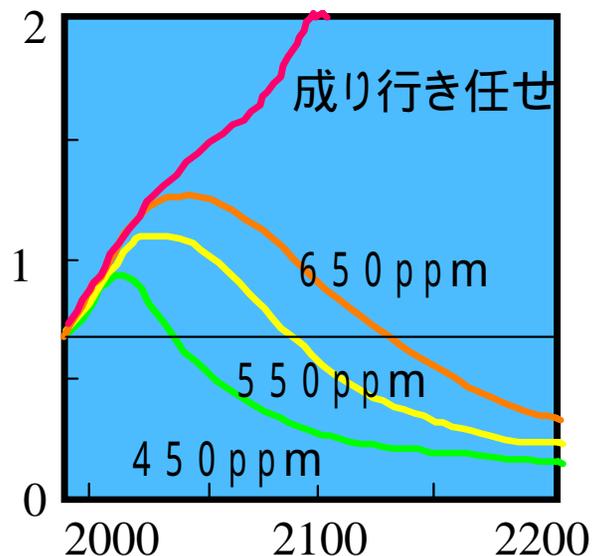
ただし、今世紀前半は省エネなどの抑制策が中心。

本格的な脱二酸化炭素エネルギー源は、技術開発を待って今世紀後半に本格的に投入。



地球再生計画:1990年、世界環境保全に
関する閣僚会議において日本提案

二酸化炭素排出量
(100億トン/年)



西暦
二酸化炭素濃度安定化に必要な放出削減

核融合の特徴と導入上予想される困難

先進国では需要の大きな伸びは予想されない。

- ・ エネルギー需要は増えない：人口、産業構造、省エネ
 - ・ 核融合（新型原子力）の導入は軽水炉等の代替・建替え中心。
 - ・ 火力代替は天然ガスコンバインドサイクルが有利。
 - ・ コスト、負荷追従性、実績で軽水炉に勝る強い理由は？
 - ・ 市場は成熟。I P P と競争激化。供給過剰の恐れ
 - ・ 市場競争が目的なら公的資金の根拠希薄。
- 電源として他のエネルギー、原子力に対して
決定的なメリットを持ちうるか？

核融合の「長所」が生かしにくい

- ・ 軽水炉の代替ならおそらく立地点は遠隔地。
新規でも地価から遠隔地になる。（ 近距離立地の可能性 ）
- ・ 長距離送電網は完備。
 - － 立地点や送電費用は軽水炉と差は出ない。
- ・ 放射性廃棄物、安全性は、原子力政策上同等
 - － 核融合と核分裂は同じ被曝量で管理
- ・ 燃料サイクルは核分裂でも国内で完備（の方針）
- ・ 軽水炉の数 10 年の安全実績、地元の容認の逆転は非現実的
 - － 我が国では軽水炉、高速炉と同一の市場を分け合うことになる。
 - － 核融合の導入規模の限界が市場規模、シェア両方にある。

核融合のエネルギーとしての利点は？

代替エネルギーとして

- 他のエネルギー源に代わる供給力があること
- 他の選択肢が許されないときにも使えること。
- 資源、環境、社会受容、社会適合性

より魅力的なエネルギー源として

—核融合しかできないこと、他のエネルギー源にできないエネルギー供給は？

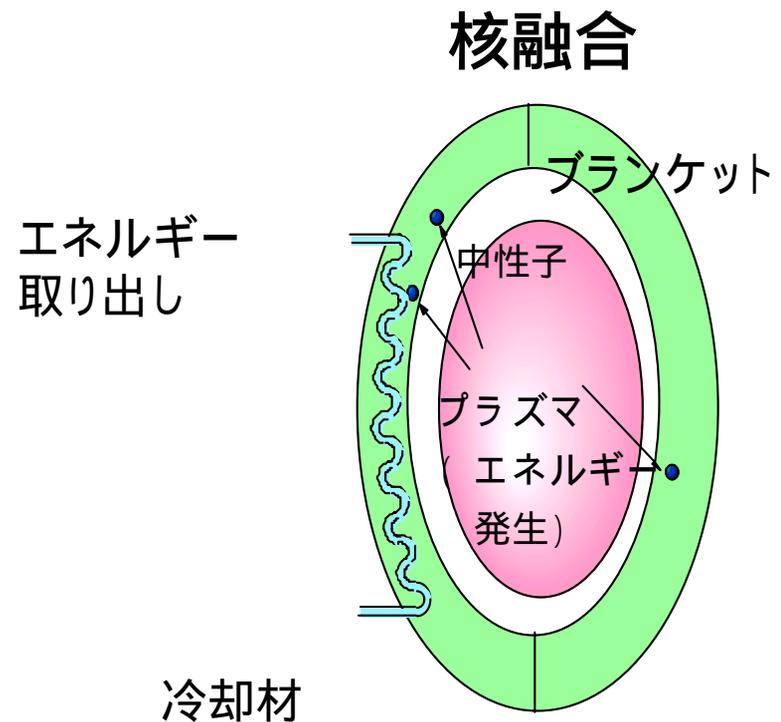
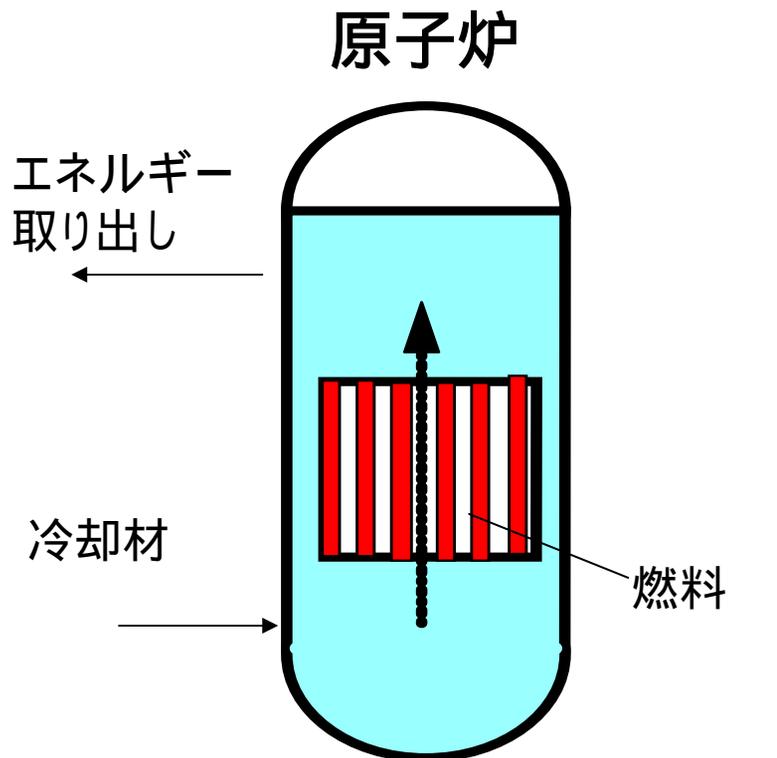
- 他のエネルギー源で代替されないか？
- 他の電源があるとき低コスト電源は本当に必要か？
(供給過剰になるだけ)

核融合の開発意義 軽水炉、FBRと競合する候補とする
他のエネルギーにできないことをする

核融合の特徴（再考）

1) 燃焼とエネルギー取り出しの分離

- ブランケットはプラズマに影響しない
- ブランケットはプラズマと独立に交換、稼働



火力発電に似ている

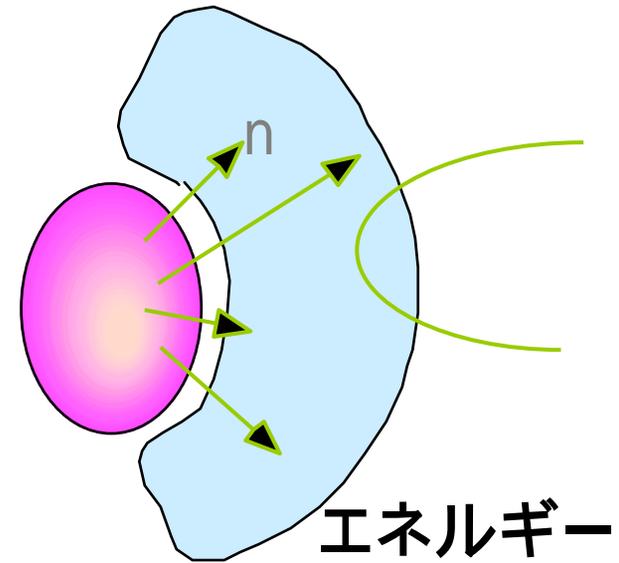
2) 利用可能熱の温度が炉心設計と独立

臨界に影響する核分裂炉との相違

同じ炉心に異なる冷却材

材料以外に利用温度に制限がない

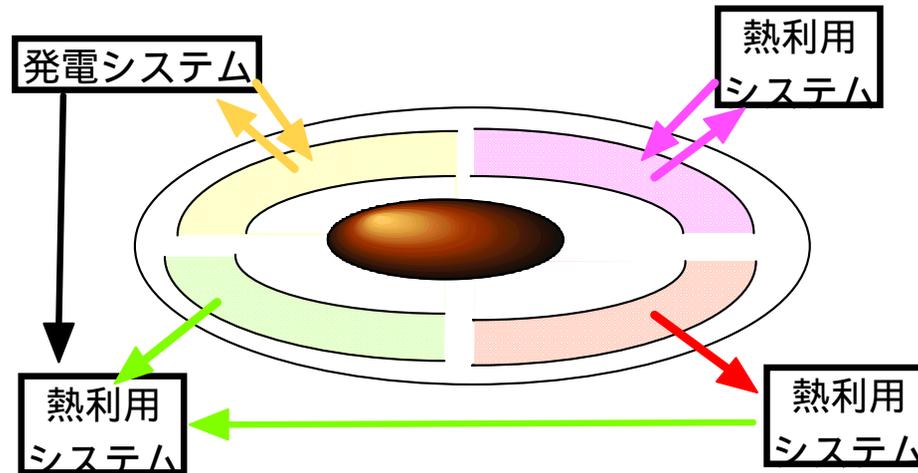
(再生可能エネルギーに対する利点)



3) ブランケットの交換性、モジュール性

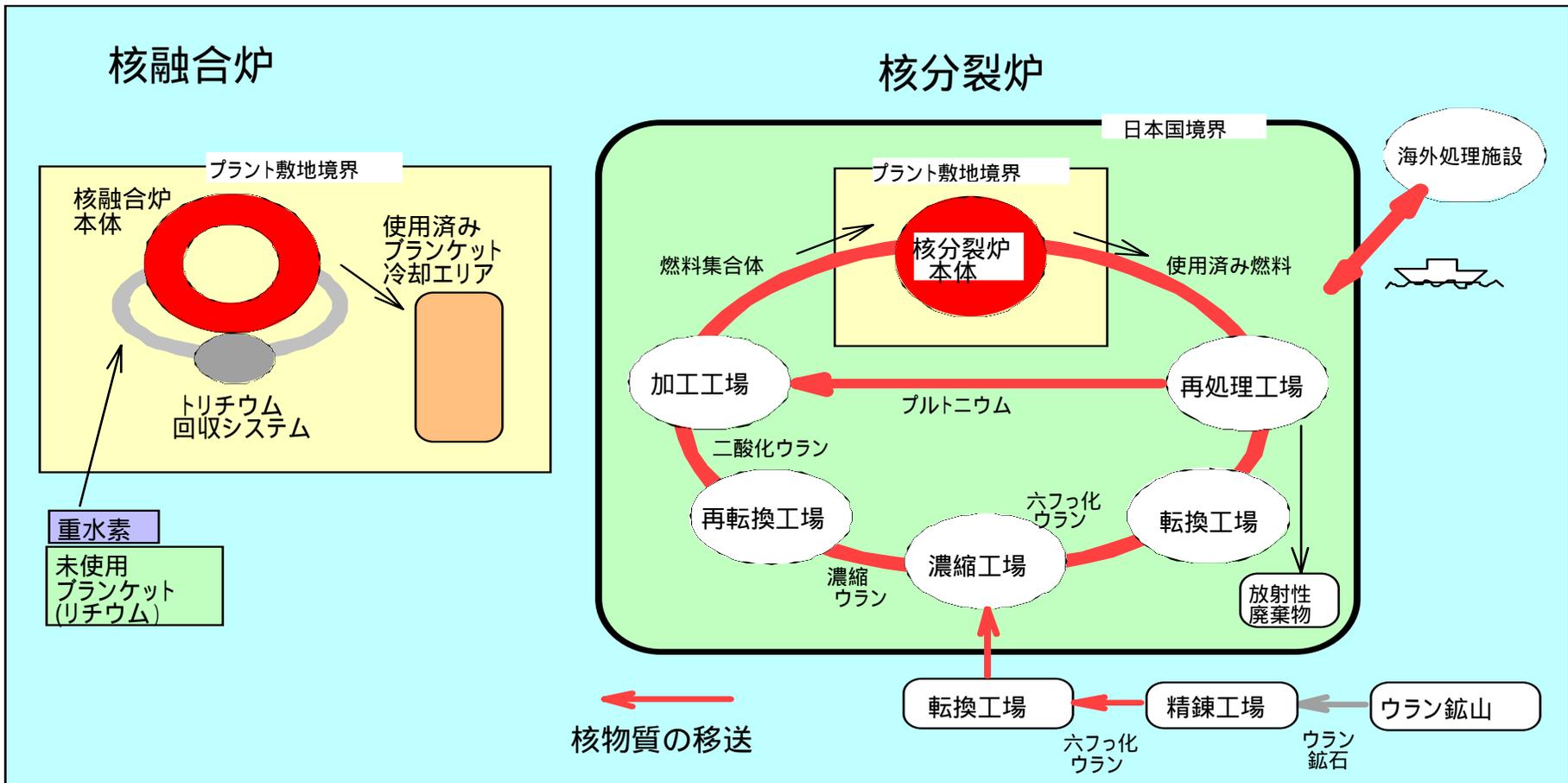
利用法の時間的可変性—需要への即応性

利用系の同時多目的性



4) 閉じた燃料サイクル

- 燃料製造、再処理が同プラント / サイトで可
- 燃料制約が少ない、国産
- 核拡散抵抗性: 核関連物質を使用、保管、移送しない



5) ハザードポテンシャルが低い

離隔距離が小さい

— 立地制約が少ない — 需要地近接立地の可能性

安全対策に自由度がある

- 能動的な安全対策が可能

生物学的危険度 (BHP):

$$\frac{\text{放射エネルギー}}{\text{空気中最大許容濃度}} = \text{無害まで薄めるのに必要な空気の量}$$

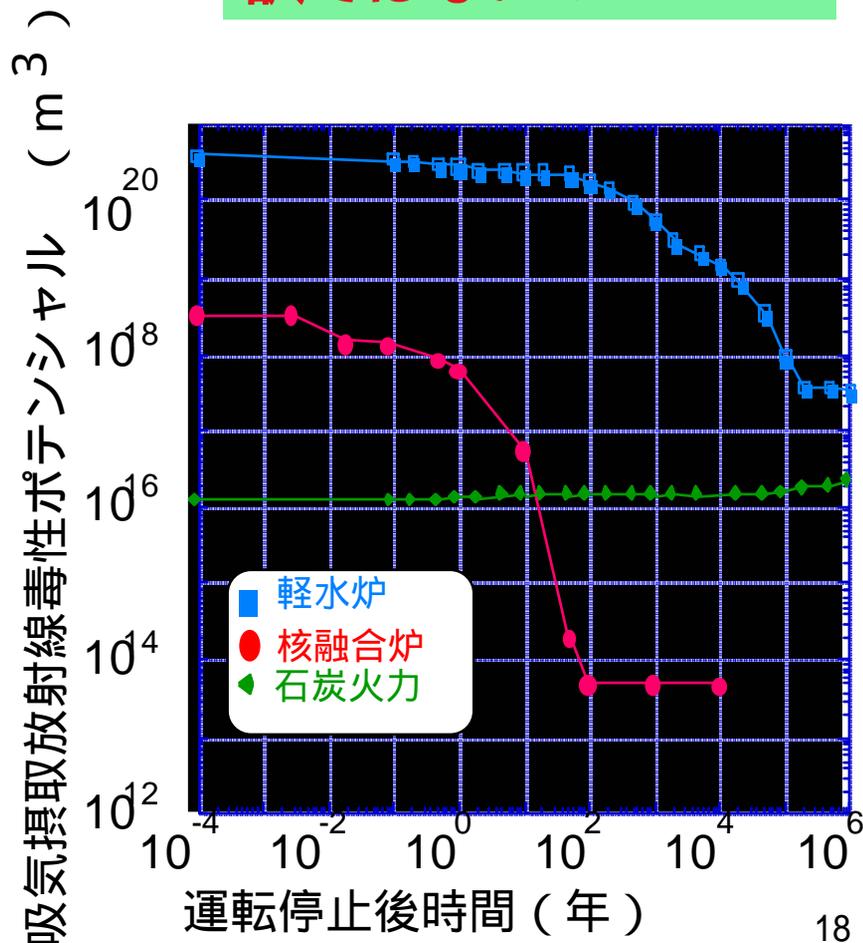
主な核種:

核融合炉 — トリチウム

軽水炉 — 核分裂生成物

石炭火力 — トリウム、ウラン

原子炉より安全という訳ではない!



核融合の未来市場の可能性

1) 発電

大規模集中：ベースロード電源
— 供給不安定な自然エネルギー補完
分散電源化には燃料製造で対応

2) 燃料生産

水素、新合成燃料の製造
— 化石燃料資源の有効利用
— 水の分解のためのエネルギー
— 輸送用燃料供給

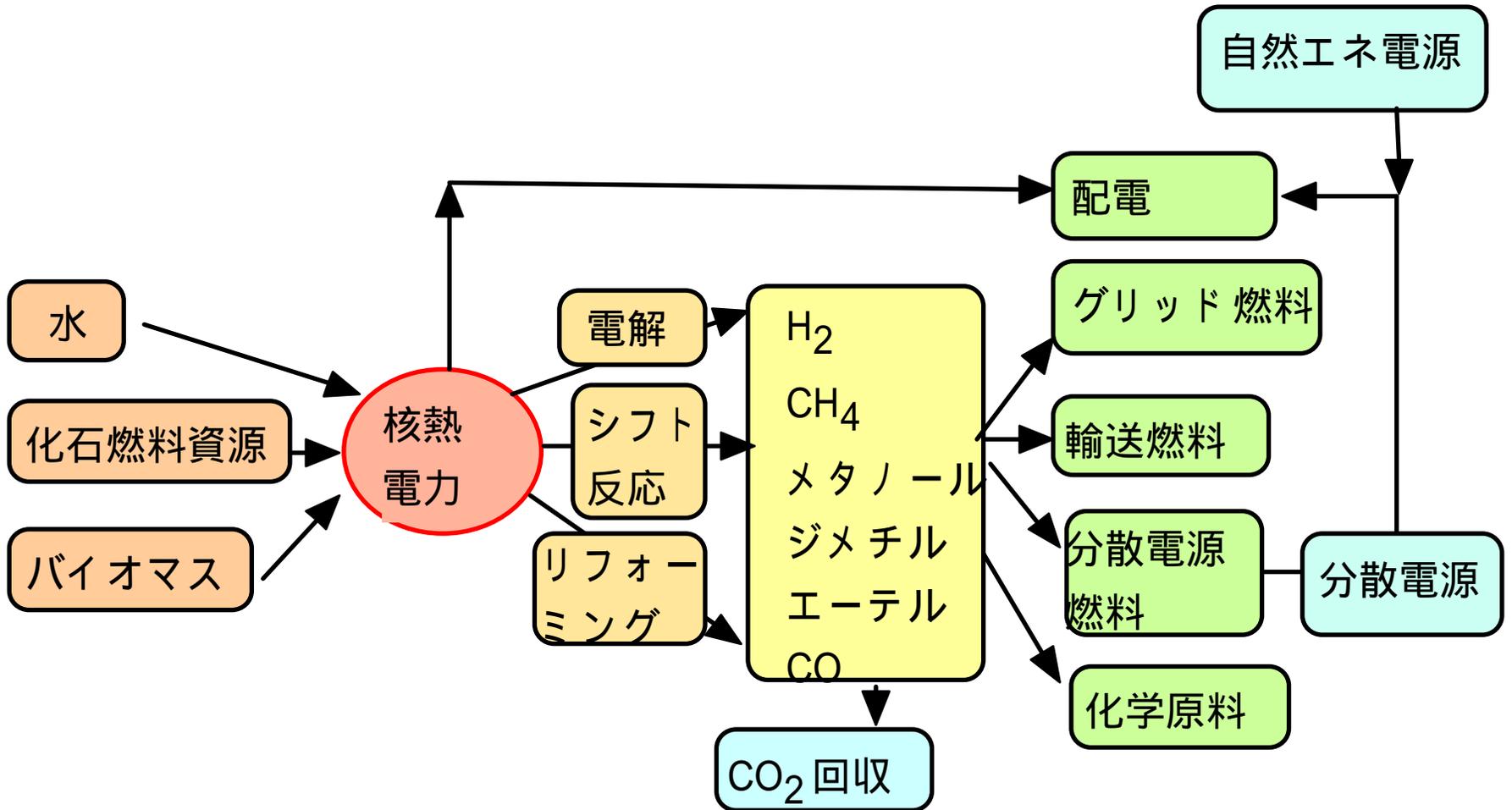
3) 多目的利用

工業熱源
— 資源リサイクル、化石資源の有効利用
— 廃熱利用 海水脱塩
核変換処理

未来型エネルギー
システム未来化への
適応

エネルギーシステム
未来化への原動力

核融合と未来エネルギー



核融合エネルギーの利用

中性子利用

合成燃料の製造

熱エネルギー

核融合プラント

工業利用

熱エネルギー

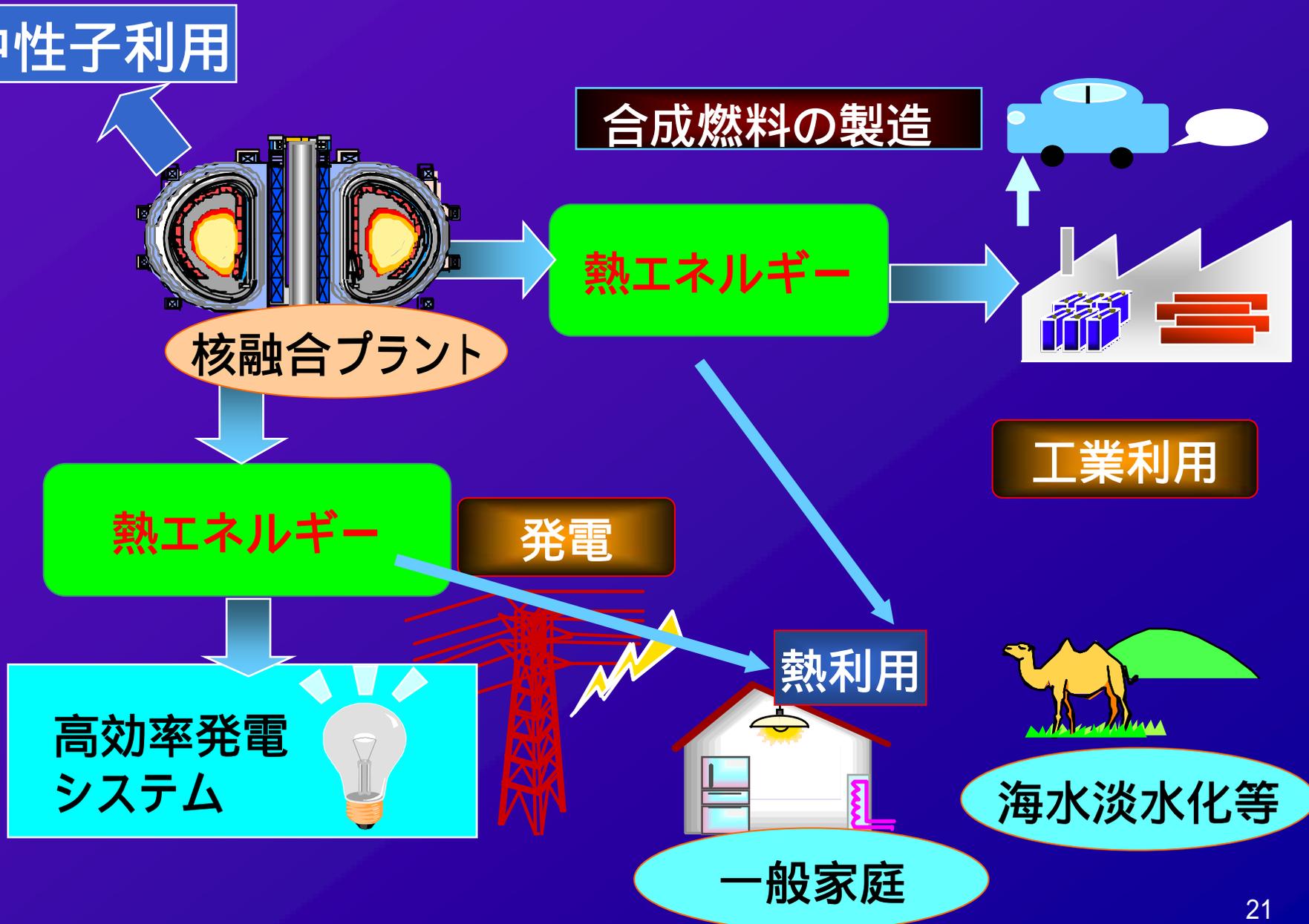
発電

熱利用

高効率発電
システム

海水淡水化等

一般家庭

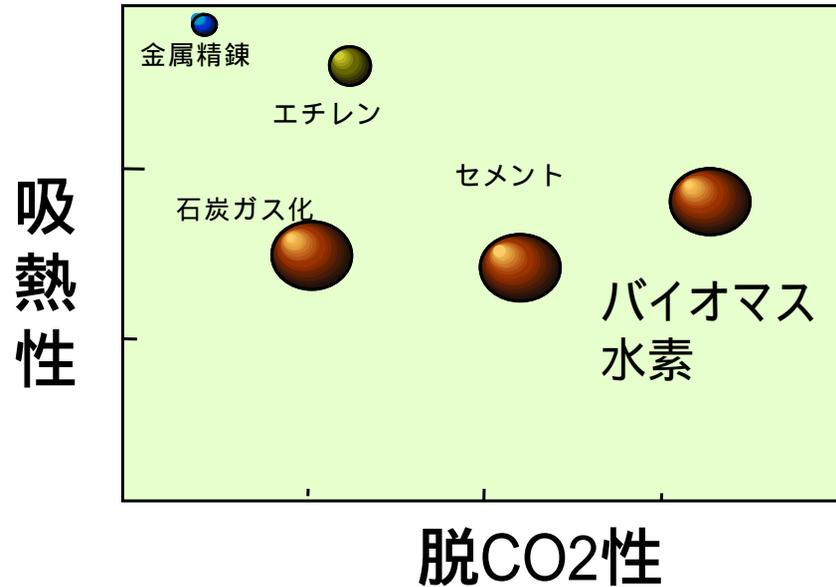


社会適合性の観点で考える核融合の利用法

ーバイオマスの加水熱分解による水素製造

視点:

- 吸熱性
- ・熱利用
- 脱CO2性
- ・環境対策
- 市場規模
- ・投資の意義
- ・核融合適合性



(900 ~ 1200)、30kcal/mol

軽水炉 電気分解の10倍以上の発生量。
ー熱出力3GWで1700万台の燃料電池車分

廃棄物処理 / 燃料製造量

・2120 t / hの廃棄物を処理

・280t/hのH₂を生成

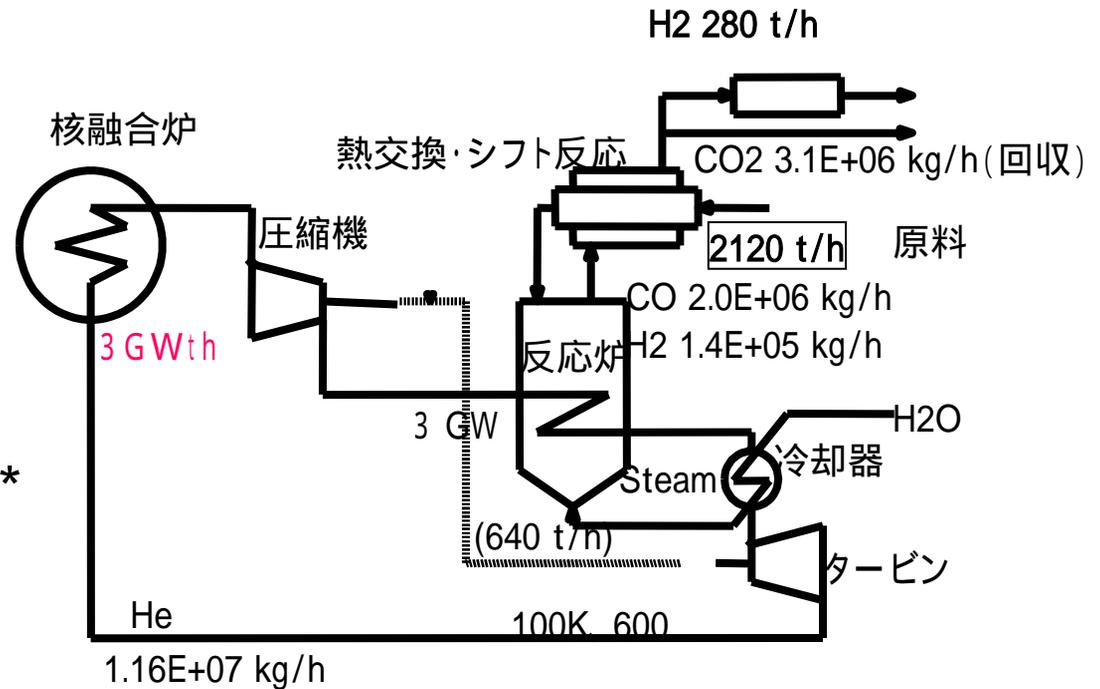
エネルギー生成

・2.5GWの熱出力に対して5.2GWを
燃料電池で発生

FC車110万台 / 日に供給*
年間1700万台分**

* 6kg/台日と仮定

** 460g/台年と仮定



発熱	3 GW	発電効率	発生電力	消費エネルギー	発生水素量
	軽水炉—水電解	33%	1 GW	286 kJ/mol	25 t/h
	高温炉—水電解	50%	1.5 GW	231 kJ/mol	44 t/h
	高温炉—水蒸気電解	50%	1.5 GW	181 kJ/mol	56 t/h
	高温炉—廃棄物	—	—	60 kJ/mol	340 t/h

核融合がつくる未来の社会(先進国型)



核融合のつくる未来の世界(途上国型)

発展途上国への導入可能性

- ・燃料供給、処理、核拡散
- ・経済開発力
- ・安全性



発展途上国への導入可能性

1 世紀には主として途上国が経済開発にエネルギー源を要求

先進国で成立しない「長所」が生かせる

- 途上国は、インフラがないので廃棄物、送電費用は大きく影響。
- 分裂炉、高レベル廃棄物のない国では、BHPの差がでる。
- 電力の自由競争市場が未成熟
- 発電コストは燃料費重視
- 潜在的危険性の差は、カントリーリスクのある地域で有効
- 未熟な運転（?!）でも安全裕度が大きい。

自立燃料サイクルの意味

- 途上国は分裂炉を導入しても燃料サイクル完結は困難
- 濃縮ウラン、燃料加工、ワンススルー以外での再処理は対外依存

- 高レベル廃棄物処分の問題
 - 供給側先進国も、再処理能力は十分でない。
 - 燃料供給、使用済み燃料処理のサービスを保証できない。
 - （分裂炉売り込みで当時の先進国は実施）
- 核融合なら設置国はエネルギー自立達成が可能
 - 設置国のエネルギーセキュリティ確保
 - 設置国周辺の政情安定に寄与

核融合の安全と核拡散抵抗性

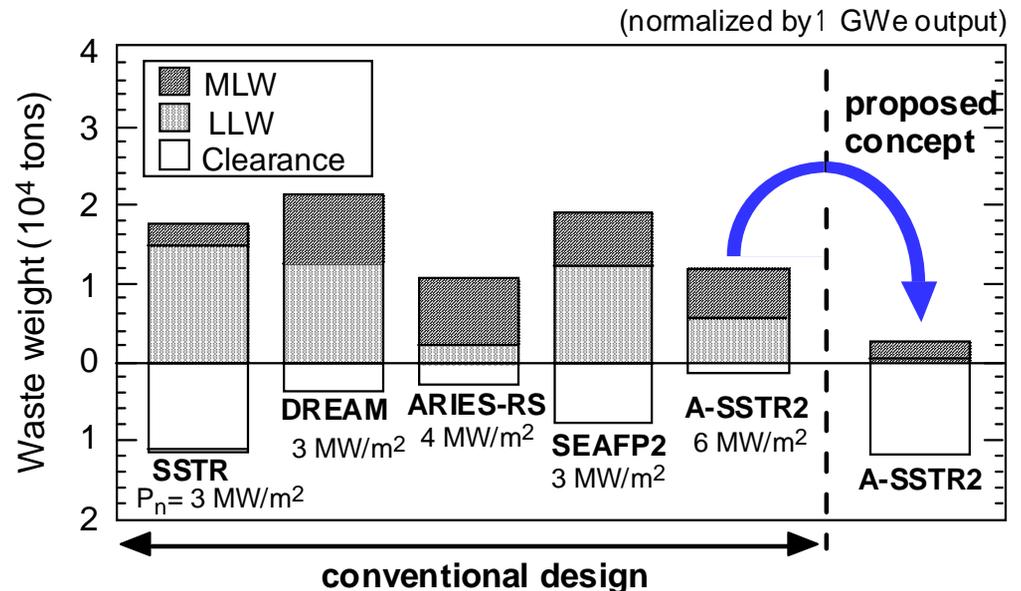
- 核融合は核拡散の懸念が小さい
 - 国際規制に抵触せず導入 / 供与がしやすい
 - 近隣諸国を政治的に刺激しない
- 核融合なら核関連輸送物の国際輸送を増やさない
 - テロ、事故対策の問題が少ない

安全性の観点でみた核融合の市場性

1) 廃棄物

- 廃棄物は、同じレベルのカテゴリーでは、処理処分費用は容積、性情に大きく影響される。(放射能 B q ではない)
- 高レベル廃棄物は、直接コスト以外に外部コストが大きい。
- 核融合では、廃棄物発生量の低減が技術的に可能。
- ただし、クリアランス廃棄物が一般廃棄物として扱われるとは限らない。

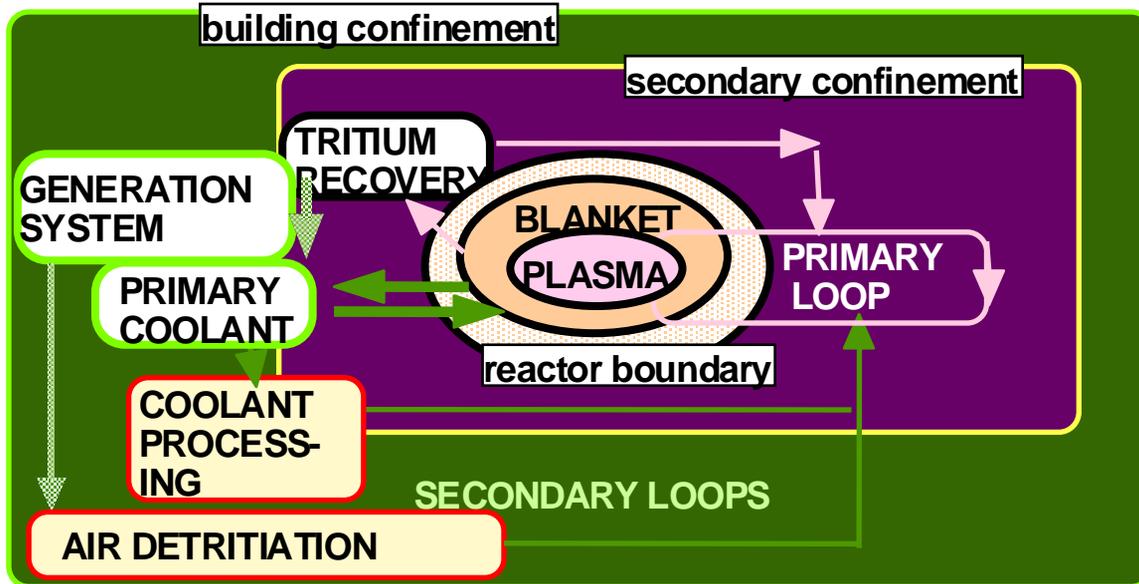
廃棄物は
外部コストの問題。



2) 核融合施設の工学的安全性

- 核融合の「原理的安全性」は、「事象の進展」に大きく影響する。
- 安全システムの機能は、ハザードポテンシャルで決まる。
- 核融合では、施設の安全性は、炉心でなく、プラント安全設備で確保する。

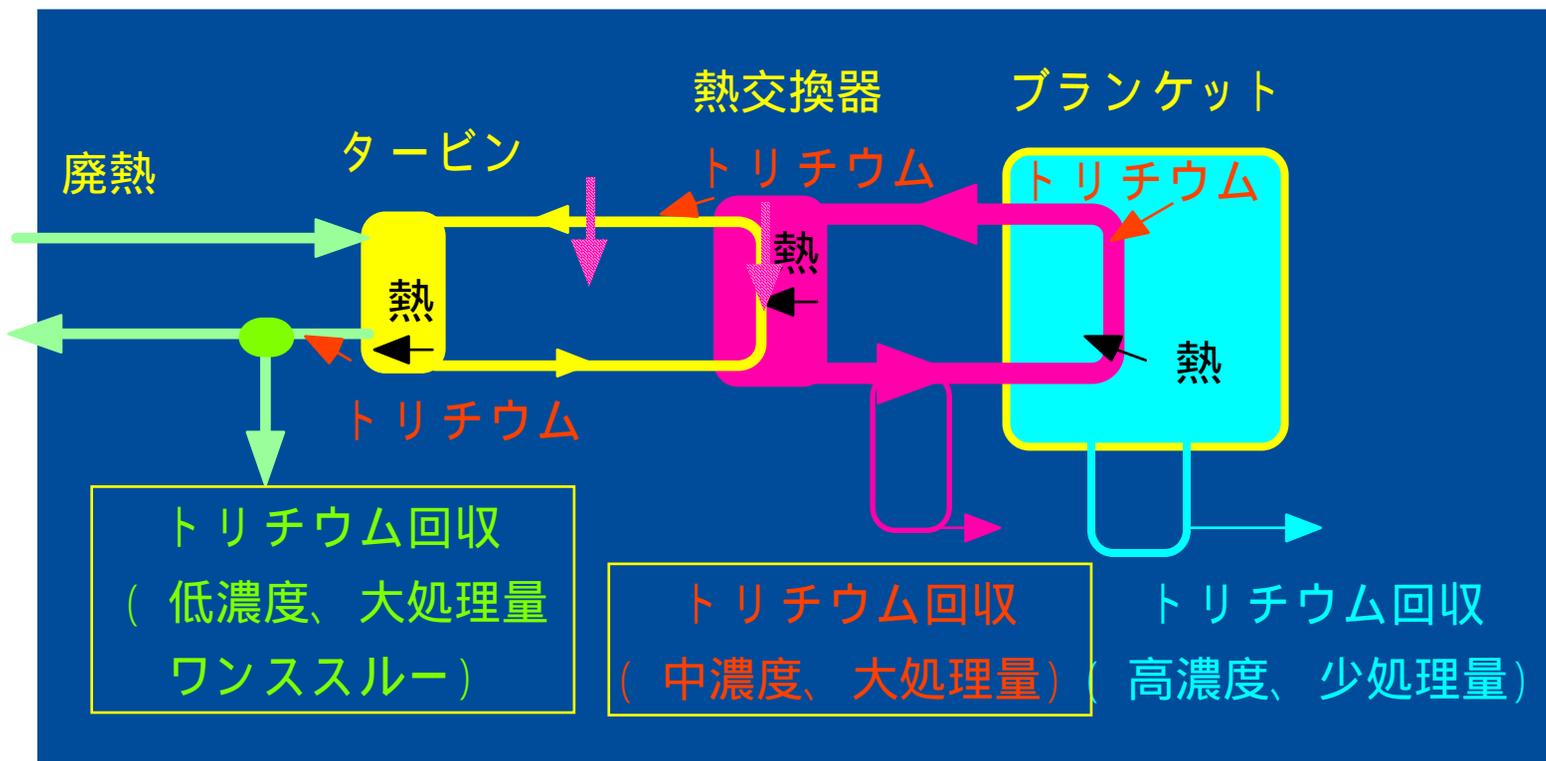
一般化した動力プラント



	PRIMARY LOOP	COOLANT PROCESS
TRITIUM INVENTORY (kg)	1	05
TRITIUM THROUGHPUT (kg/ky)	30	05
TOTAL THROUGHPUT (kg/ky)	60	50000

 tritium flow
 tritium leak/perm

- 核融合は、形式を問わずブランケット系のトリチウム処理が環境、周辺の安全の決め手となる。
- 異常放出にも、常用システムで対応可能
- サイトに依存しない、型式での安全評価に可能性を開く。



模式化した安全システム

4 . 核融合研究開発の経済効果

過去、現在および近未来の技術波及分

- ・ケーススタディとして、原研を例に、核融合研究の過程で開発された極限技術が他の産業分野に活用された利用例を摘出。
- ・市場創出を各技術、製品について追跡。経済価値に換算。2000年までで43技術59製品。
- ・この価値創出に対する原研の寄与分を第3者機関(日本総研)の査定により評価。
- ・それぞれの商品市場規模に対して概ね研究開発費比率は5～11%、そのうちの原研の寄与は5～30%と評価された。

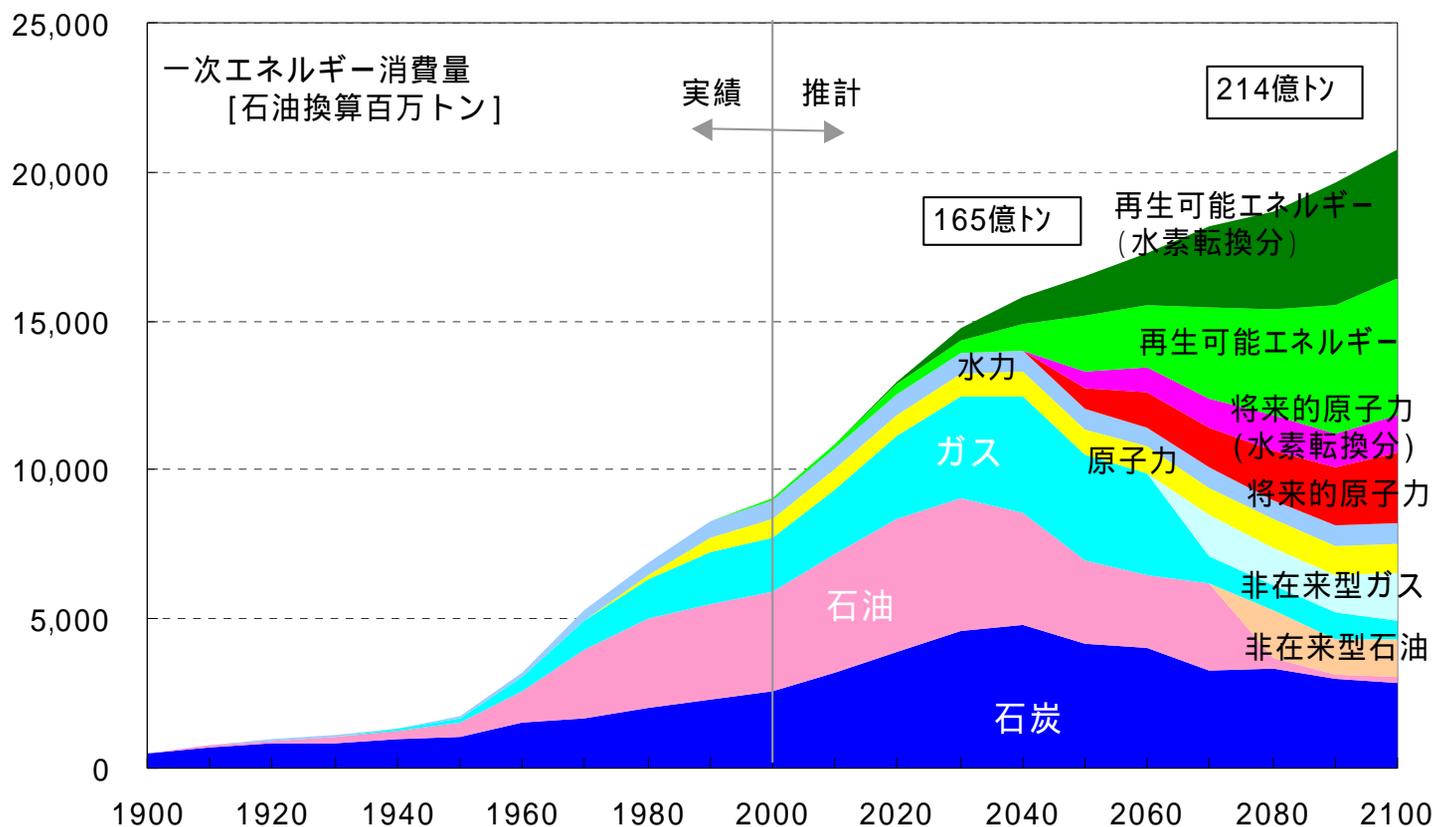
創出市場規模は2.7兆円(日本総研の評価による)

このうち原研核融合の研究開発投資の効果は1150億相当。

ただし、原研の研究費は、デフレータ補正、1969-2000年積算で6570億 + 人件費650億。

未来の核融合の経済規模

- 核融合の開発が成功して2050年以降核融合エネルギーが利用されたとしてその市場規模、経済効果を評価する。
- 市場創出効果としては、電力売り上げと発電機器の売り上げ、およびそれらの経済波及効果を計算する。また核融合なしでのケースと比較してコスト削減の効果を評価。
- 全ての効果は、2%の割引率で現在価値に割り戻したものを2100年まで積算した。



(日本エネルギー経済研究所)

核融合の経済価値(まとめ)

1) 直接効果 - 市場創出

- ・我が国における電力売り上げにおける2100年までの核融合の寄与23%、4000億KWh、電力単価を18.8円/kwhとする。(実際はこれを核分裂とシェアしなければならない。)
- ・現在価値に割戻した積算値 37兆円。

2) 直接効果 - 発電設備・機器の国内売り上げ

- ・核融合の寄与分は上記と同じ。売り上げのうち発電単価6.6円/kwh、うち35%が核融合特有の機器とする。交換部品を含む。
- ・現在価値積算値 4.5兆円。

3) 直接効果 - 発電設備・機器の輸出売り上げ

- ・モデル計算により2100年の全世界の総発電量80兆kwh、核融合のシェア平均30%。
- ・このうち、現在核融合開発を行っていない国のシェア70%を核融合開発を行った国が投資額に比例して分配したと仮定。
- ・2050以降の我が国の輸出額の現在価値積算値 47兆円。

4) 直接効果 - 電力コスト削減効果

- ・2100年までの全世界の総電力需要を核融合なしで賄った場合の総電力支出と、核融合がある場合の総電力支出の差。
- ・全世界で700兆円の寄与。日本では35兆円。

	市場総額 (兆円)	原研寄与分 (兆円)	含経済波及 (兆円)	雇用創出 (万人・年)	付加価値創出 (兆円)
電力売上	37	7.4	14.6	385	4.0
機器国内	4.5	0.90	29.7	114	4.0
機器国外	47.1	9.4			
電力コスト 削減	35	20.0			20.0

2100までの国内研究開発費の推定

我が国の核融合研究開発を実用化まで(～2050)現在価値で3兆円(ITER国内負担5000億、DEMO1兆、基盤1.5兆)、事実上全て国家負担とする。1969年からの分を加えると実用化までは3.66兆円。

2050年～2100年は軽水炉導入と同様と仮定。日本国内の研究開発費合計は2.29兆円。以上から、1969年基礎研究から出発して2100年までの研究開発投資は現在価値5.95兆円と推定される。

2100までの技術的成功率、経済的成功率はここでは考えていない。

核融合の投資効果：未来

1. 電力総売上

世界で1600兆円 (ただし日本はその 5%.)

2. 電力コスト削減効果

(化石燃料による高騰の回避)

世界で700兆円

3. 核融合機器の輸出市場

世界市場130兆円



核融合装置の経済効果は工業製品の製造販売 波及効果が大

一我が国で経済波及220兆、雇用創出880万人年 (原研・日本総研試算)

5 . まとめー核融合の意義と開発戦略

投資効果の観点からみた核融合の導入シナリオ

投資効果を最大化しようとするすると核融合観が変わる

- 途上国展開は先進国電源に限定するより市場が大きい。
- 大きな市場規模の可能性は大きな開発投資を正当化。
- 我が国としては大きな輸出市場の開拓
- 途上国の急速な経済開発、地球環境問題から開発の緊急性（CDM）。
—軽水炉の代替や化石資源の枯渇では核融合開発に緊急性はない（BAUでは必要とされない）
- 温暖化対策技術として、緊急性（2030実証、2050投入）が必要。わが国では、FBRと同様にその時期の「候補」。
- 割引率の観点では、遅い導入は投資額の削減を要求。
- 燃料、特に水素の製造は、核融合の市場性を大きく増加。
水素製造では他エネルギーより有利。
- 外部性によるエネルギー評価と、その利益最大化。

エネルギーセキュリティ

- ・早期の実用化ー「保険」/バックストップ(高騰抑止効果)
- ・エネルギー国産化、化石資源を節約
途上国への援助、輸出
 - 多面的なセキュリティ効果
- ・国家技術力、産業競争力の確保
- ・セキュリティの外部コストの定量化と利益最大化

開発上の新たな課題

核融合の市場性向上のためには。。。

- ・小型化、工期短縮、負荷変動、起動電力、増設速度、途上国導入、燃料入手性。
- ・多様な利用法ー水素製造、核変換、資源リサイクル。
- ・技術基準確立と簡素化された許認可プロセス。

6 . 補論 - 第三段階の見直しの必要性

核融合の位置づけの変化があれば:

- ・エネルギーとしての可能性と意義付け
- ・資源、環境の見方の変化
- ・FBRとの関係
- ・投資の効果の評価。効果に見合った資源配分。
- ・輸出市場の可能性。デファクトスタンダード獲得、創業者利益確保の問題。

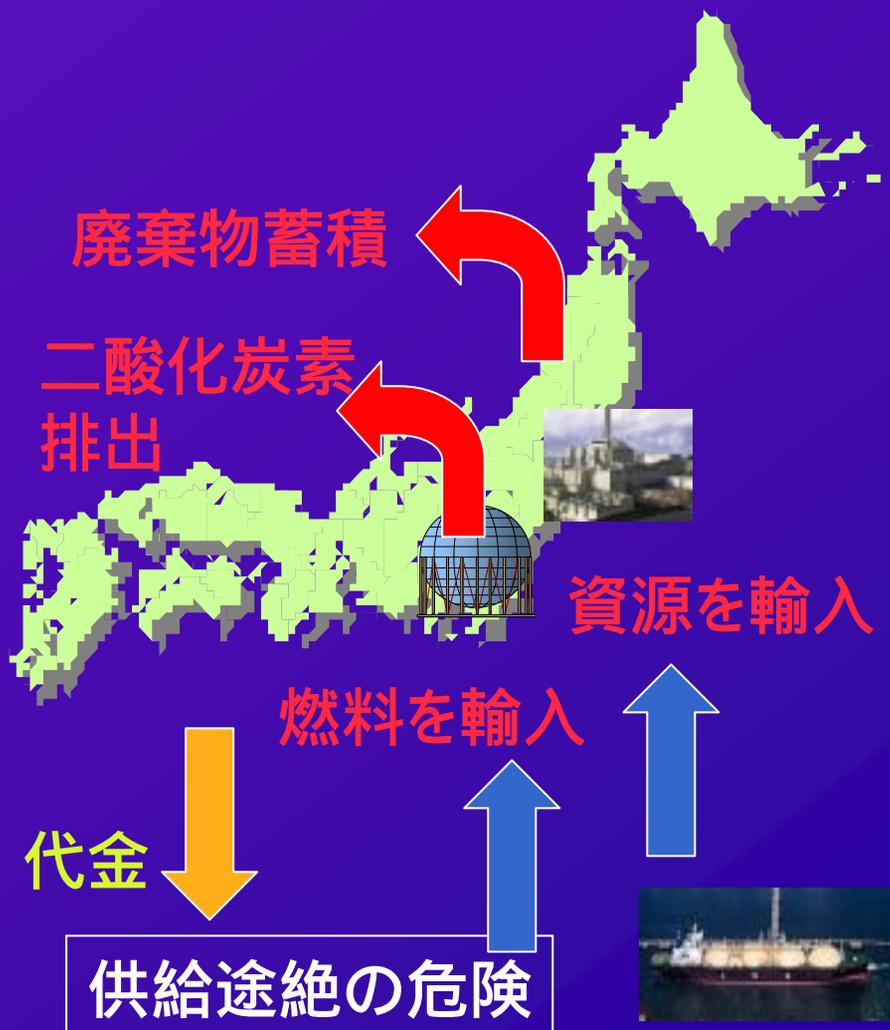
加速計画ーエネルギー環境シナリオの要請に対して

- ・環境シナリオと整合性ある開発スケジュール
- ・国外の状況と日本の国益
- ・早期開発による投資の早期回収
- ・2050まではエネルギー候補として、バックストップ効果を。
- ・2050以降は世界市場での展開。

核融合の位置づけは「わが国をどうしたいか」という政策の一環。

日本のエネルギーと核融合

● 資源輸入に頼る現代



● 核融合のある未来

