

核融合と水素製造について

核融合専門部会
第13回核融合研究開発基本問題検討会

平成15年10月24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

なぜ核融合を
研究するのか？
なぜ水素なのか？
水素エネルギー社会

2. 水素製造技術

現在の水素製造
技術的に考えられる
水素製造
水素製造法の比較

3. 核融合エネルギーと水素

核融合による水素製造
水素製造とエネルギー源
核融合と水素社会

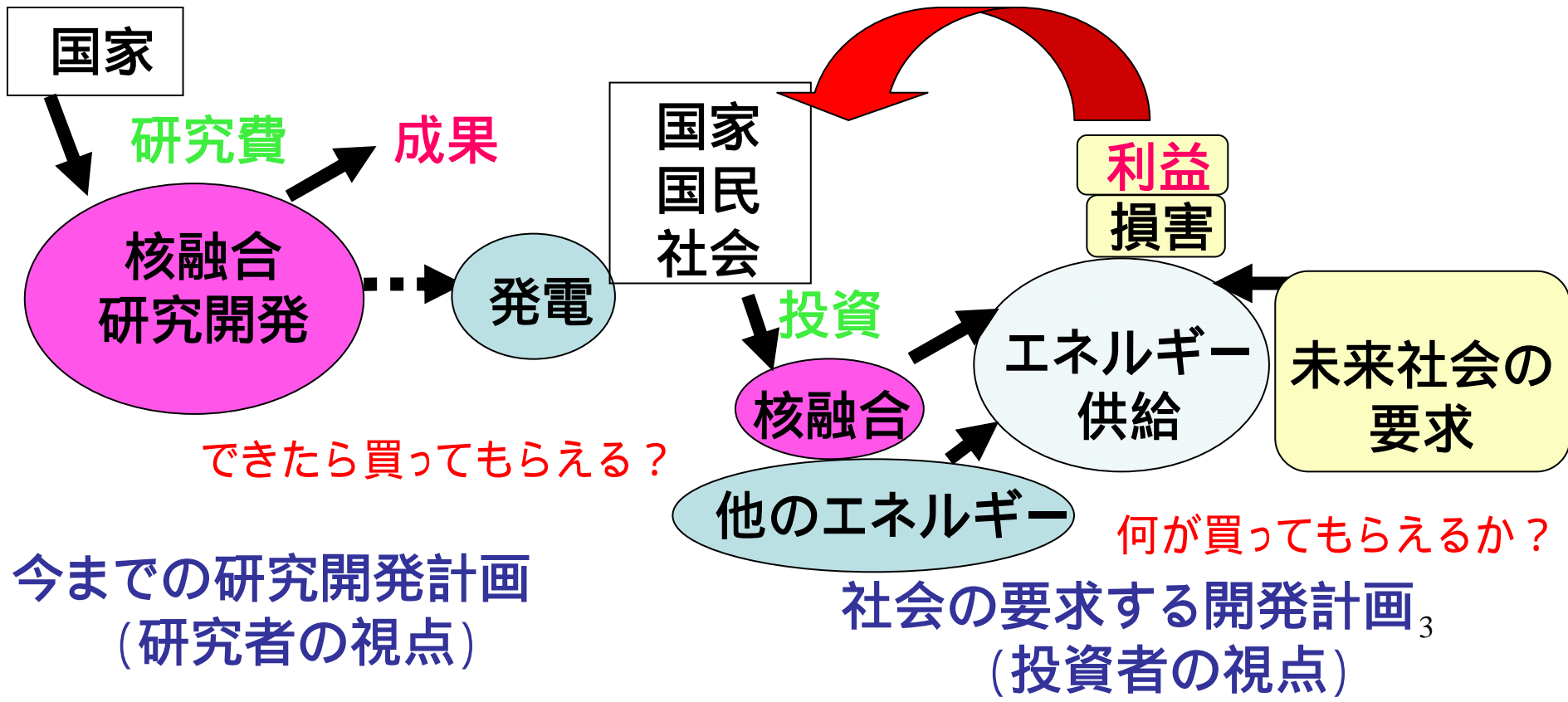
4. まとめー核融合の意義と 水素製造

核融合水素と導入シナリオ
他のエネルギー源との比較
核融合の意義

1. はじめに

なぜ核融合を研究するのか

「核融合が実現したら電気を買ってもらえる」 から
「社会が必要とするから核融合を実現する」 へ

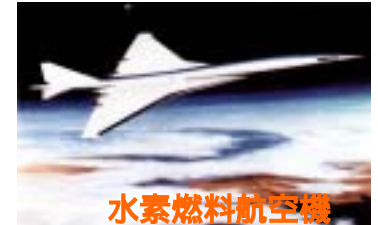


なぜ水素なのか？

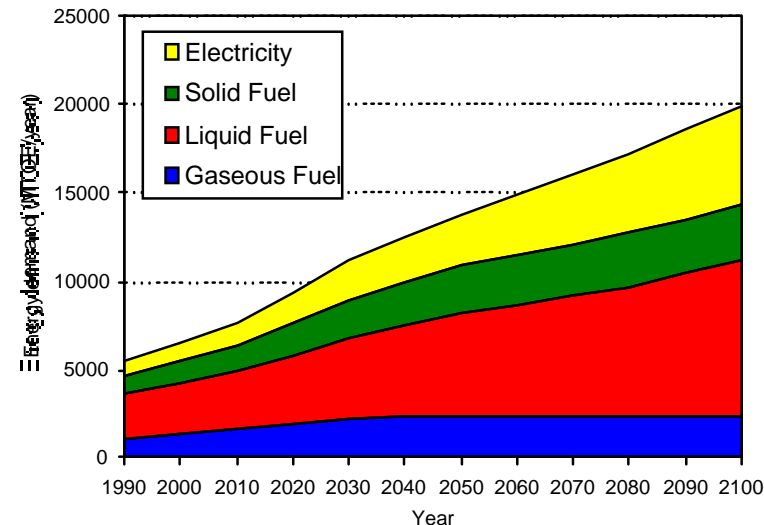
- ・未来の燃料は脱炭素
 - 化石燃料の需給の逼迫
 - 地球温暖化問題
- ・未来燃料としての水素
 - 自動車用燃料電池(高効率、低騒音)
 - 航空機燃料(高速、軽量)
- ・未来の電力は分散化
 - 分散電源はコジェネレーションができる
 - 分散電源は需要に即応できる
 - 電力自由化
 - 再生可能エネルギーの導入
 - グリッドの充実を必要としない
 - 遠隔、小規模需要に対応
- ・分散電源の燃料
 - 燃料電池
 - マイクロガスタービン



燃料電池自動車

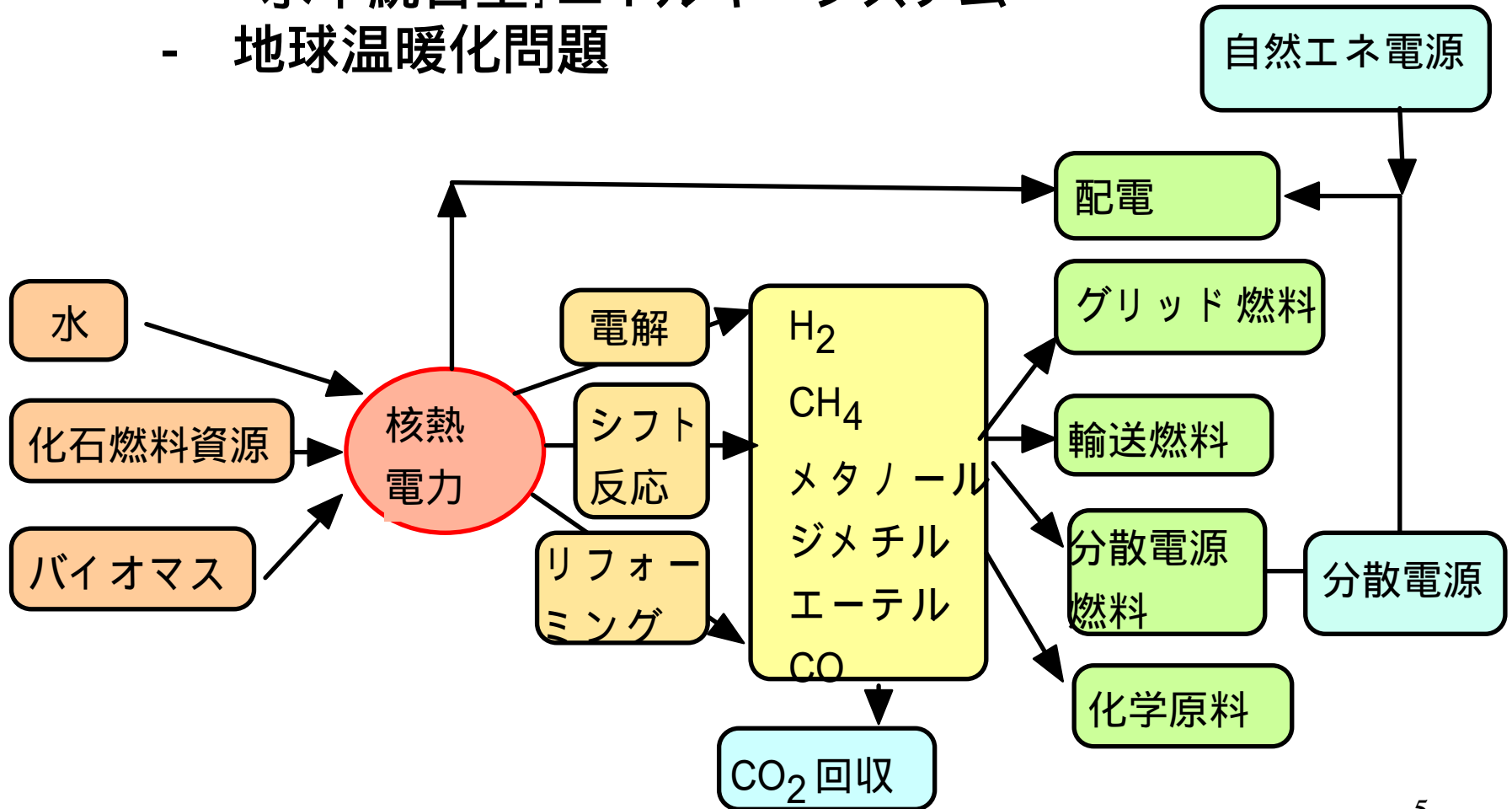


水素燃料航空機



水素エネルギー社会

- ・水素と電力は相互変換可能
 - 「水平統合型」エネルギーシステム
 - 地球温暖化問題



2. 水素製造技術

現在の水素製造

スチームリフォーミング(水蒸気改質)



- ・天然ガスなど化石燃料を原料に水素をつくる
- ・大きな吸熱反応
- ・熱エネルギーを供給するため原料の一部を燃焼
(部分酸化法)

技術的に可能な水素製造

製鉄工業の副産物ーコークス炉ガス

製鉄所のコークス炉から水素(50%)、メタン等が発生
生産量は80000t/yレベル

- ・現在はプラント内で消費
- ・二酸化炭素発生量は増えない

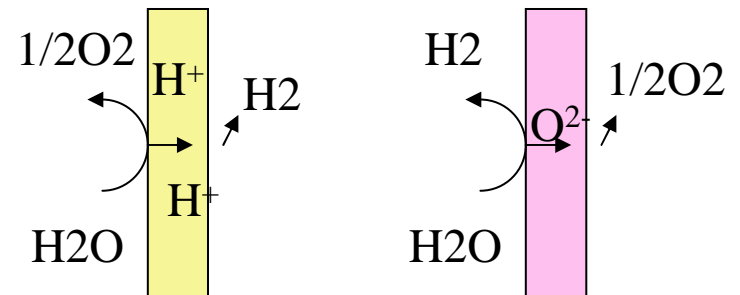
電気分解

- ・第二次大戦以前は主流
(アンモニア工業用原料)

・電解法の種類

- アルカリ水溶液電解
- SPE(Solid Polymer Electrolyte)
- 高温水蒸気電解

アルカリ水電解 2V ~
SPE電解 1.5V ~ 2V
水蒸気電解 1.0V ~ 1.5V



SPE

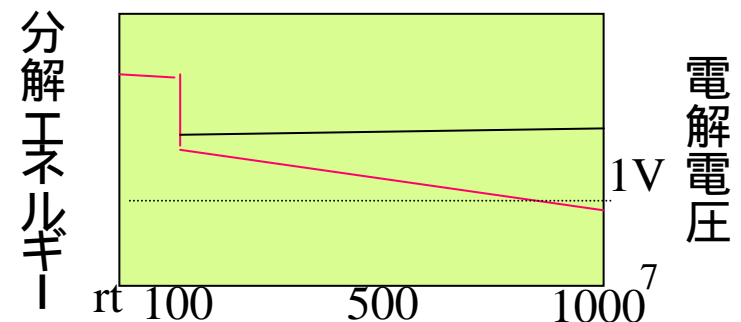
水蒸気電解

・原理: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$

必要な電流はクーロンの法則で決まっている。
必要な電圧が消費電力i.e.エネルギー効率を決定。

$$H = G + T + S$$

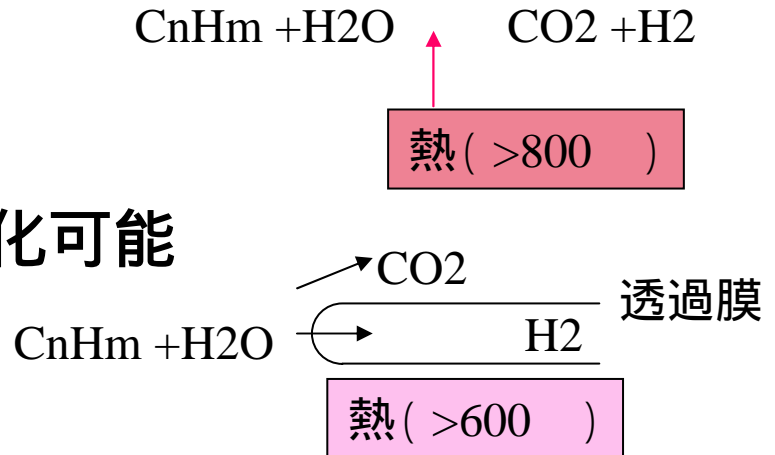
発生圧力に自由度がある。
製品純度が高い



水素製造プロセス

リフォーミング

- ・石炭、石油の液化
- ・天然ガス
- メンブレンリアクターで低温化可能



熱化学的水分解

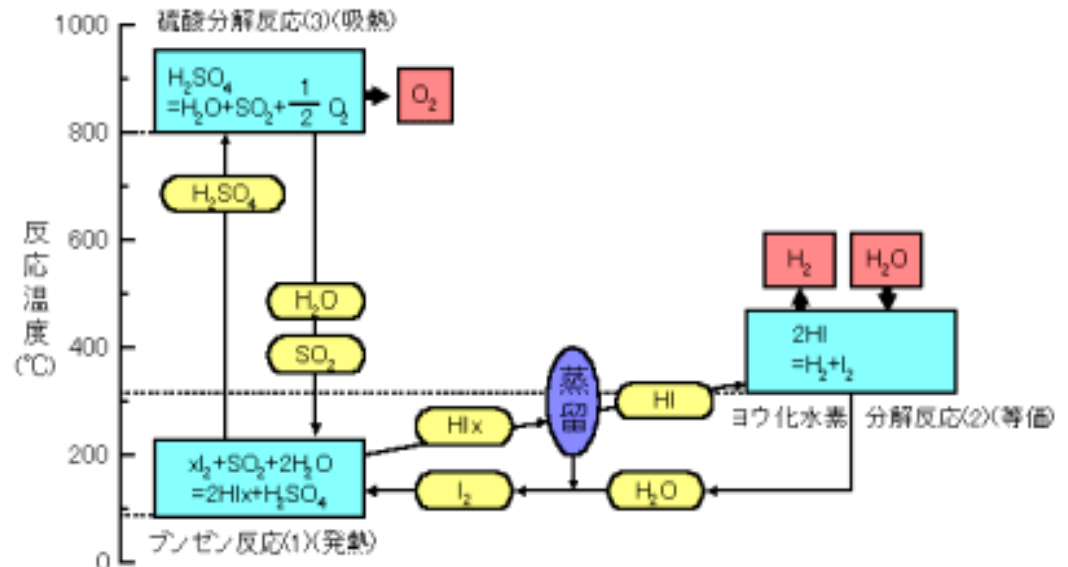
- ・IS法（実は吸熱反応－発熱反応の熱サイクルになっている）

バイオマスからの製造

- ・生物化学的製造
- ・熱化学的反応

光化学分解

- ・Honda-Fujishima 効果
- ・微生物による製造



水素製造法の(原理的)比較

2 酸化炭素発生源は原料とエネルギー

1) 原料と環境

| | | | |
|--------------|-----|-------------------|----------------|
| 石炭 | x x | $C + 2 H_2O$ | $CO_2 + 2 H_2$ |
| 石油 | x | $(CH_2) + 2 H_2O$ | $CO_2 + 3 H_2$ |
| ガス | | $CH_4 + 2 H_2O$ | $CO_2 + 4 H_2$ |
| 水 | | $2 H_2O$ | $O_2 + 2 H_2$ |
| バイオマス | | $(CH_2O) + H_2O$ | $CO_2 + 2 H_2$ |
| (カーボンニュートラル) | | | |

2) 資源

| | |
|-------|---|
| 石炭 | x |
| 石油 | |
| ガス | |
| 水 | |
| バイオマス | |

資源は石炭に関しては豊富

水は豊富で偏在しない

バイオマスは廃棄物系であれば、原料として消費することがかえって社会的利益となる。

3) 製造エネルギーと環境

| | | |
|------|---|---|
| 石炭 | × | × |
| 石油 | | × |
| ガス | | |
| 核熱 | | |
| 再生可能 | | |

実際は効率を含むライフサイクルアナリシス
- 効率が悪いプロセスは環境を汚染する

4) エネルギー効率

- ・コストが安くともエネルギー効率が悪いものがある (eg, 天然ガス)
- ・水の熱化学分解は水蒸気改質より効率が悪い (Hの差)
- ・電気分解は高効率でも発電効率が問題
 - 元来、最も高品位のエネルギーである電気を燃料にするのは非効率(特に再び発電する目的なら)

3 . 核融合エネルギーと水素

核融合による水素製造

大規模熱源 = 電力源であるためすべての方法に対応可能
(高温ガス炉と同様)

電源として

- ・アルカリ水電解、SPE電解 (再生可能エネルギー、軽水炉)
- ・水蒸気電解 (高温ガス炉)

熱源として

- ・スチームリフォーミング (高温ガス炉、メンブレンリアクター併用で高速増殖炉)
- ・水の熱化学分解 (高温ガス炉)
- ・バイオマス熱分解 (高温ガス炉)

核融合による水素製造の検討例

古くから可能性は指摘されている

- ・水電解(水蒸気電解)による水素製造
 - Hydrogen production from fusion reactors coupled with high temperature electrolysis, BNL-24777 (1978)
- ・他の燃料製造
 - Fusion energy applied to synthetic fuel production, CONF-770593, DOE, (1977)
- ・熱化学水素製造
 - Hydrogen production using fusion energy and thermochemical cycles, BNL-24209, (1978)

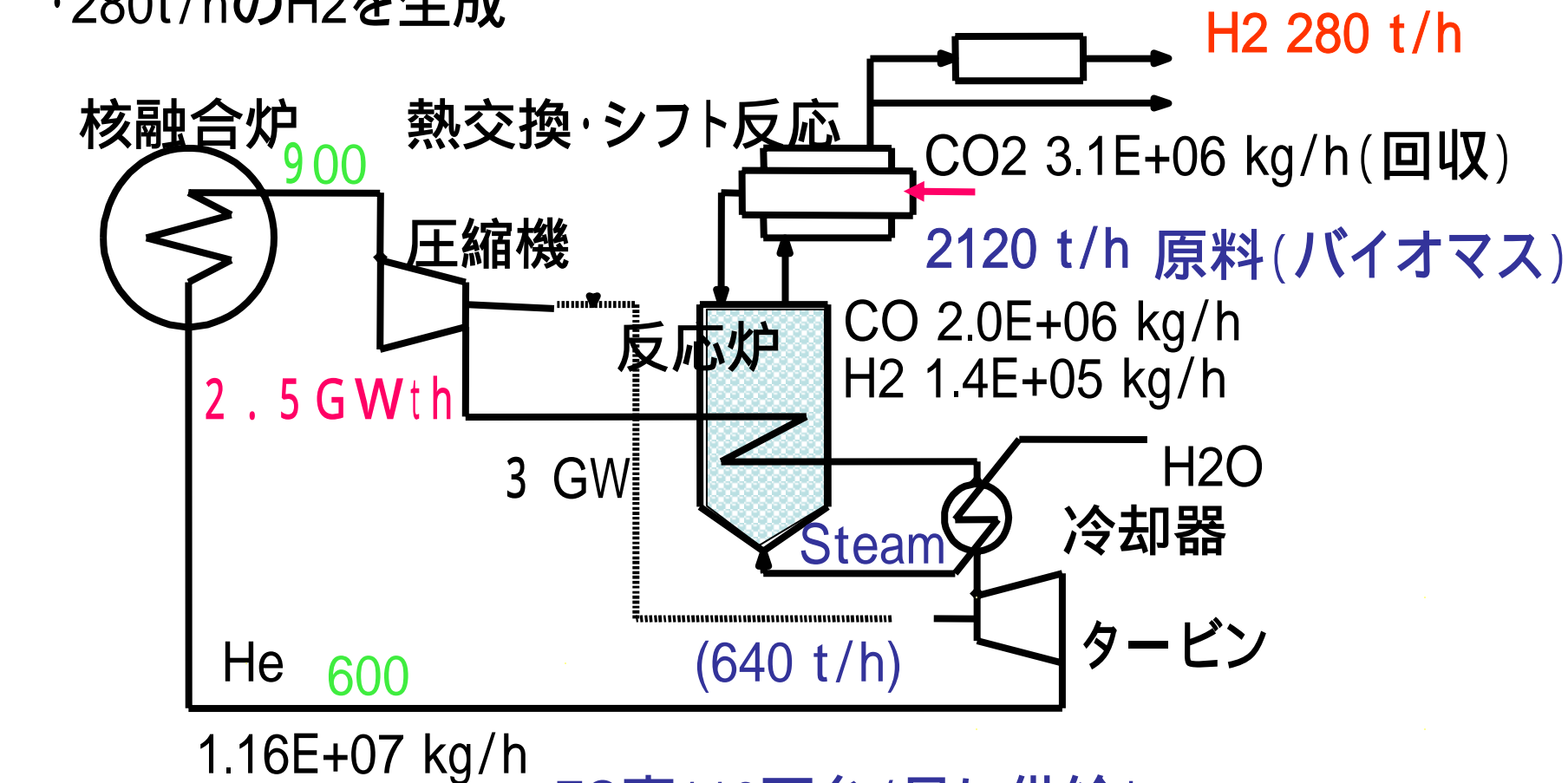
最近の提案は社会経済的視点からなされている

- ・地球環境的視点
 - J. Sheffield et al. , JIEE 2000-06(2000)
- ・核融合エネルギーの利用
 - L. Waganer. , 17th IEEE/SOFE,(1997)
- ・核融合プラントの最適化
 - 岡野ら , プラズマ核融合学会誌,77(6)(2001)
- ・核融合の社会経済性
 - S.Konishi et al.,FED 69(2003)

バイオマス(廃棄物)からの水素製造

廃棄物処理 / 燃料製造量

- ・2120 t / hの廃棄物进行处理(わが国で年間6000万トン発生)
- ・280t/hのH₂を生成



エネルギー生成

・2GWの核融合出力

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

エネルギー効率の比較

単位量の核熱からの水素生成量で評価

- ・軽水炉(300)での発電 既存技術による電気分解
- ・高温炉(900)での発電 水蒸気電解
- ・高温炉(900)からの熱化学的な水素製造

| 発熱 | 3GW | 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% | 1GW | 286kJ/mol | 25t/h |
| | 高温炉—水電解 | 50% | 1.5GW | 231kJ/mol | 44t/h |
| | 高温炉—水蒸気電解 | 50% | 1.5GW | 181kJ/mol | 56t/h |
| | 高温炉—廃棄物 | — | — | 60kJ/mol | 340t/h |

水素製造とエネルギー源

カーボンフリー熱源としての核融合の利用法の視点から

吸熱性

・熱利用(エネルギー転換)

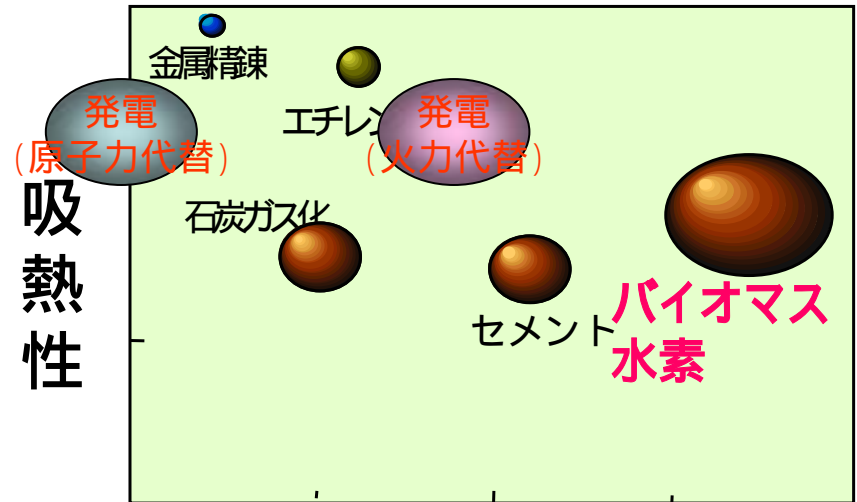
脱CO2性

・環境対策

市場規模

・大規模熱源の用途

・核融合適合性



水素製造法の視点から

| | 太陽光風力 | 軽水炉 | ガス炉核融合 | FBR |
|----------|-------|-----|--------|-----|
| 通常電解 | | | | |
| 水蒸気電解 | × | × | | × |
| 水の熱化学分解 | × | × | | × |
| 水蒸気改質 | × | × | | |
| バイオマス熱分解 | × | × | | |

核融合と水素社会

水素社会の実現の観点から核融合には他にない利点がある

- ・多くの水素製造プロセスに対応
- ・同一炉系で高温化の開発戦略が可能
- ・特に魅力的な高温熱利用に対応
- ・資源、立地制約が少なく集中増設可能なエネルギー源となる
社会の脱炭素化の原動力となる(先進国)
経済開発に対応(途上国)

核融合の観点から水素社会は適応しやすい

- ・水素市場は電力市場より最終的に大きい
- ・水素(燃料)市場はグローバル市場(核分裂政策は各国独自)
- ・水素需要は集中熱源を要求する(自然エネルギーでは困難)
- ・水素への転換シナリオが確定しない
(ブランケット、熱利用系開発の柔軟性が有利に働く)

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

熱エネルギー

発電

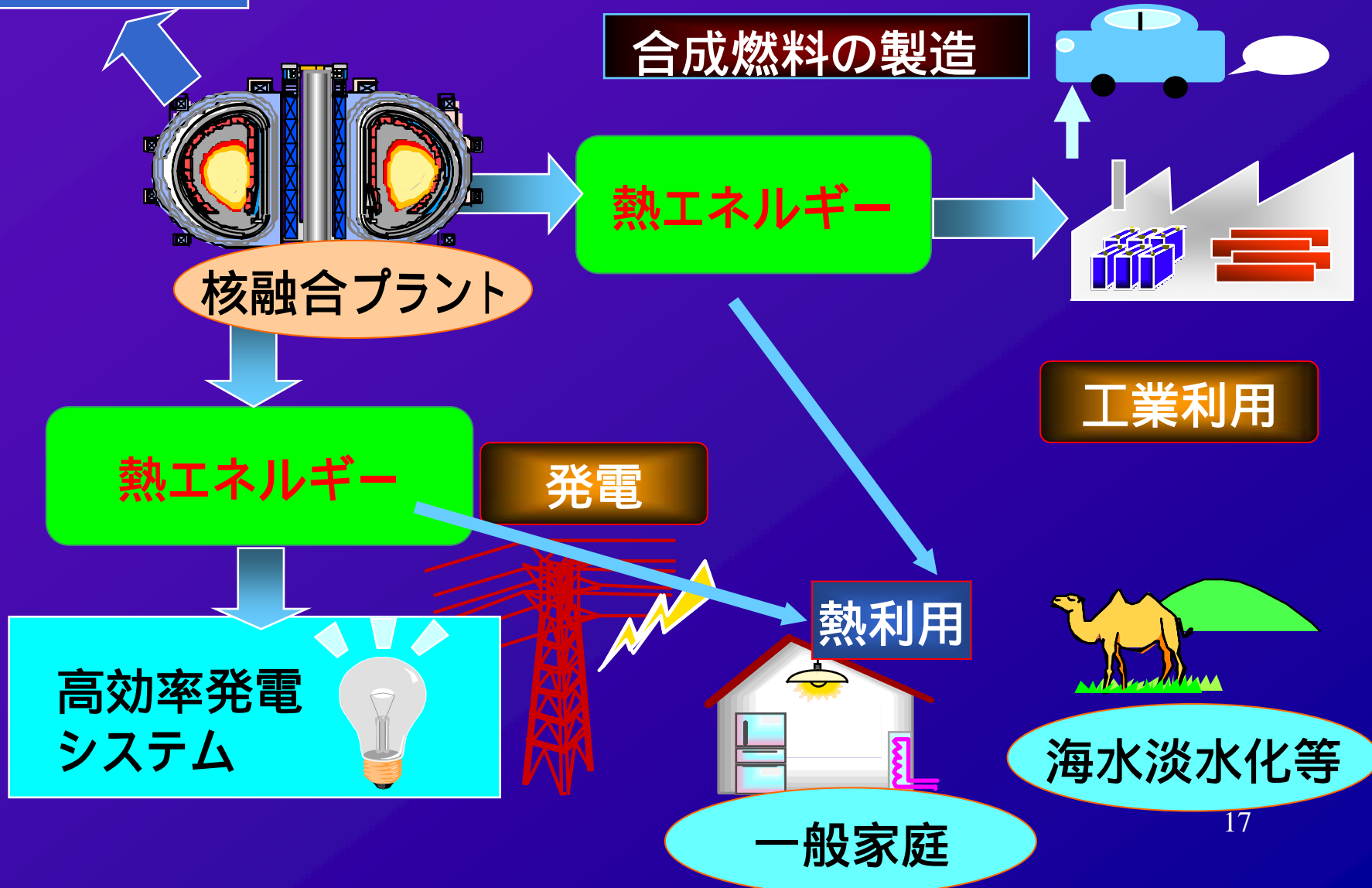
工業利用

高効率発電
システム

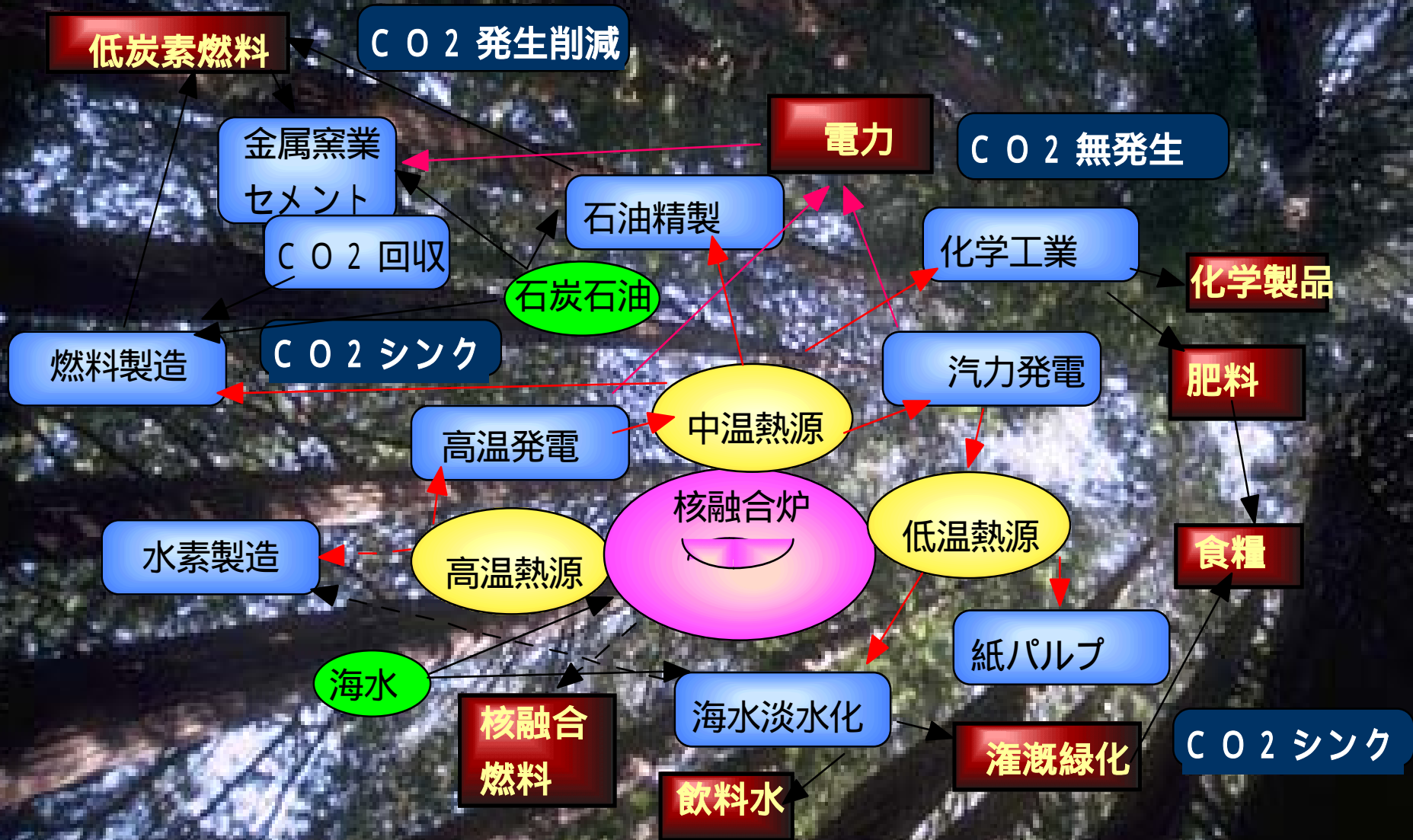
熱利用

海水淡水化等

一般家庭



核融合エネルギーと地球環境



4 . まとめー核融合の意義と水素製造

核融合水素と導入シナリオ

本格的な水素導入は今世紀後半

- ・化石原料が豊富なうちは、他の方法に経済性はない
(限定的な「バックストップ」効果はあるか?)
- ・にもかかわらず、水素源の見込みなしでは水素社会にならない
- ・核融合市場化時期と本格的な水素導入時期はほぼ一致

段階的な導入が可能

- ・通常電解、500 近傍プロセスの時代は、核融合も500 時代
- ・水蒸気電解、高温ガス炉技術の時代は核融合も高温対応
- ・資源、環境、市場を考えるとバイオマス分解も有効
- ・途上国の導入には大きなメリット

電力との併用

- ・遠隔地、余剰電力処理を考えれば電気分解も有効
- ・核融合プラントの出力平準化にも有利

他のエネルギー源との比較

高温化が可能

- ・太陽光、風力、軽水炉と異なり高温プロセス志向
- ・高速増殖炉とも温度帯は異なる。
- ・高温ガス炉とは技術的に同等

立地条件

- ・核燃料サイクル、核拡散の制約は少ない
- ・各国の原子力政策は異なるが、核融合に大きな差はない
- ・産業立地に近接が可能
- ・自然条件によらない
- ・成熟した配電網は不要

安全性

- ・大量水素プラントの安全性は未検討
- ・製品水素のトリチウム汚染の危険性は欠点

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



核融合の意義

1) 投資効果を最大化しようとする と核融合観が変わる

- ・ 水素市場は電力市場より大きい。
- ・ 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（途上国にはCDM)

2) 地球環境をエネルギー政策の柱とすると核融合観が変わる

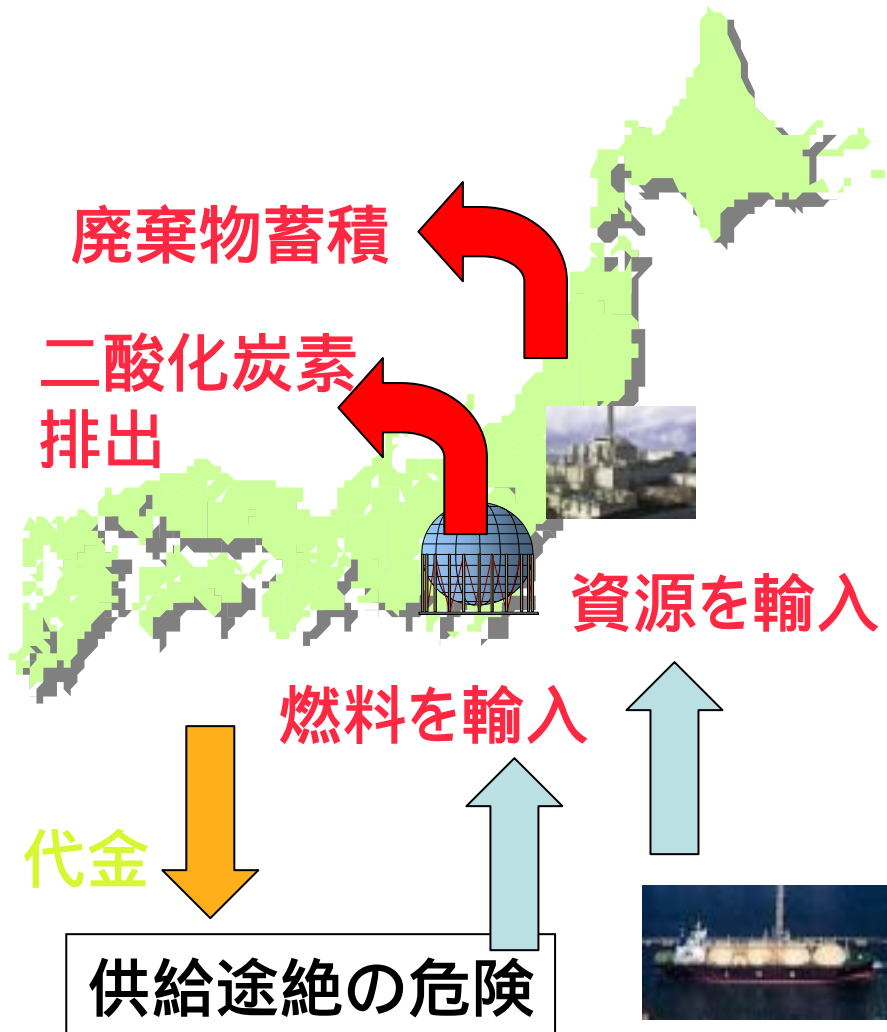
- ・ 緊急性（2030実証、2050投入）は温暖化対策戦略の要求。
— 軽水炉の代替や化石資源の枯渇では核融合開発に緊急性はない（BAUでは必要とされない）
- ・ 温暖化対策が途上国展開を要求。（世界の一次エネルギー市場での貢献）

3) リサイクル社会、水素社会への推進力、国際貢献として

- ・ 理想的なエネルギーシステムのキーテクノロジーの候補

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

