

第15回若手科学者によるプラズマ研究会

# バイオスハイブリッド核融合概念の経済的意義

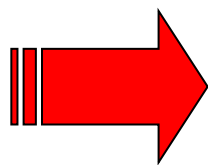
京都大学 小西哲之、伊庭野健造、登尾一幸、笠田竜太

2012.3.15

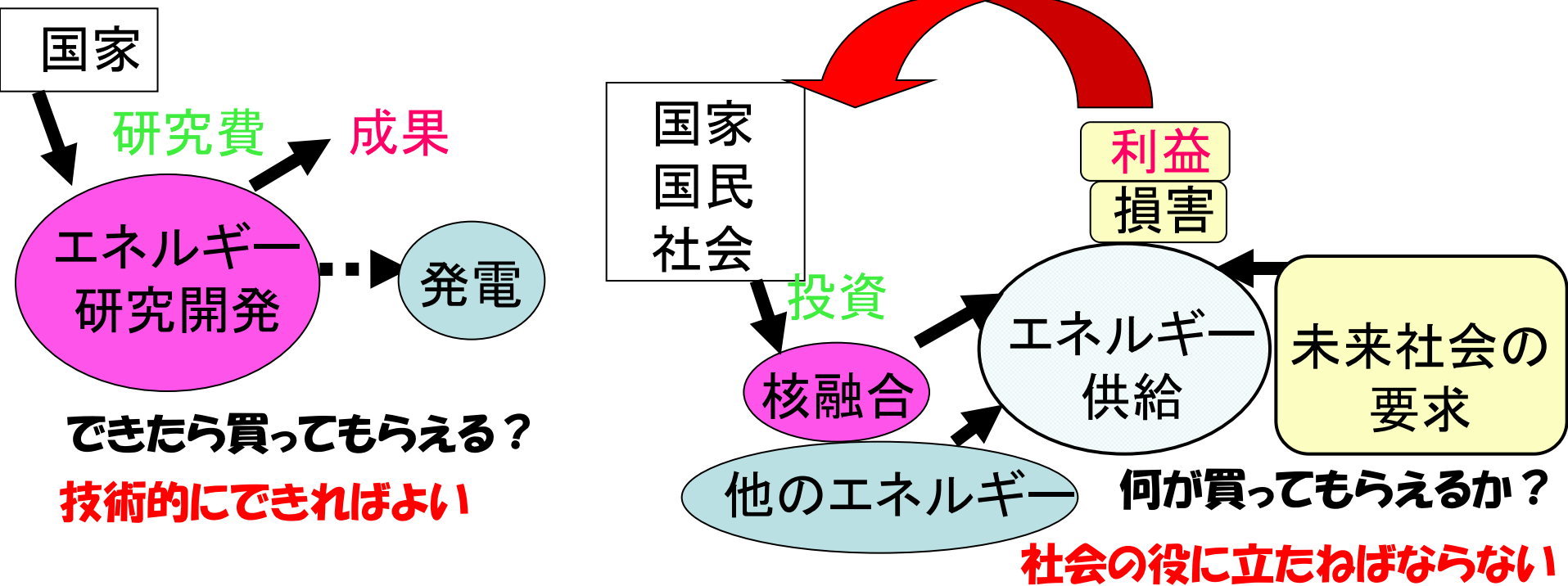
日本原子力研究開発機構那珂核融合研究所

## なぜエネルギー技術(核融合)を研究するのか？

今までの研究開発計画  
(研究者の視点)



社会の要求する開発計画  
(投資者の視点)



「エネルギーを出せばよい」から

「社会が必要とするエネルギーをつくりだす」へ

## 核融合研究は社会の要求にこたえているか？

- ・2050年に導入しても、原子力、新エネの代替
  - 二酸化炭素を削減できない
- ・資源的に強力なメリットはない
  - 無尽蔵資源の電源はいろいろある

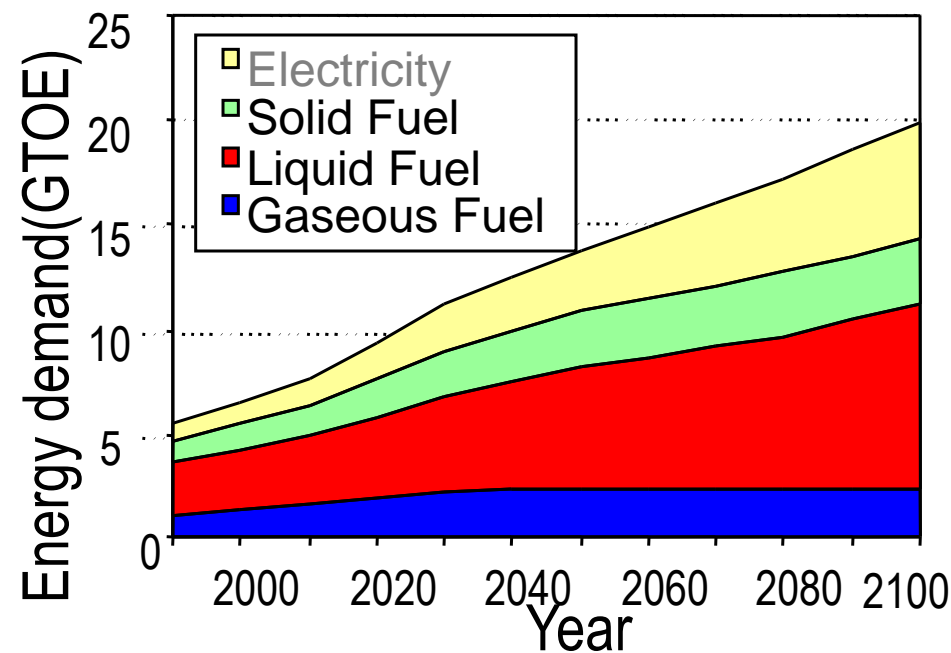
- ・燃料は電力の約4倍の市場  
すべてがCO<sub>2</sub>源。  
→化石燃料の直接代替が必要！



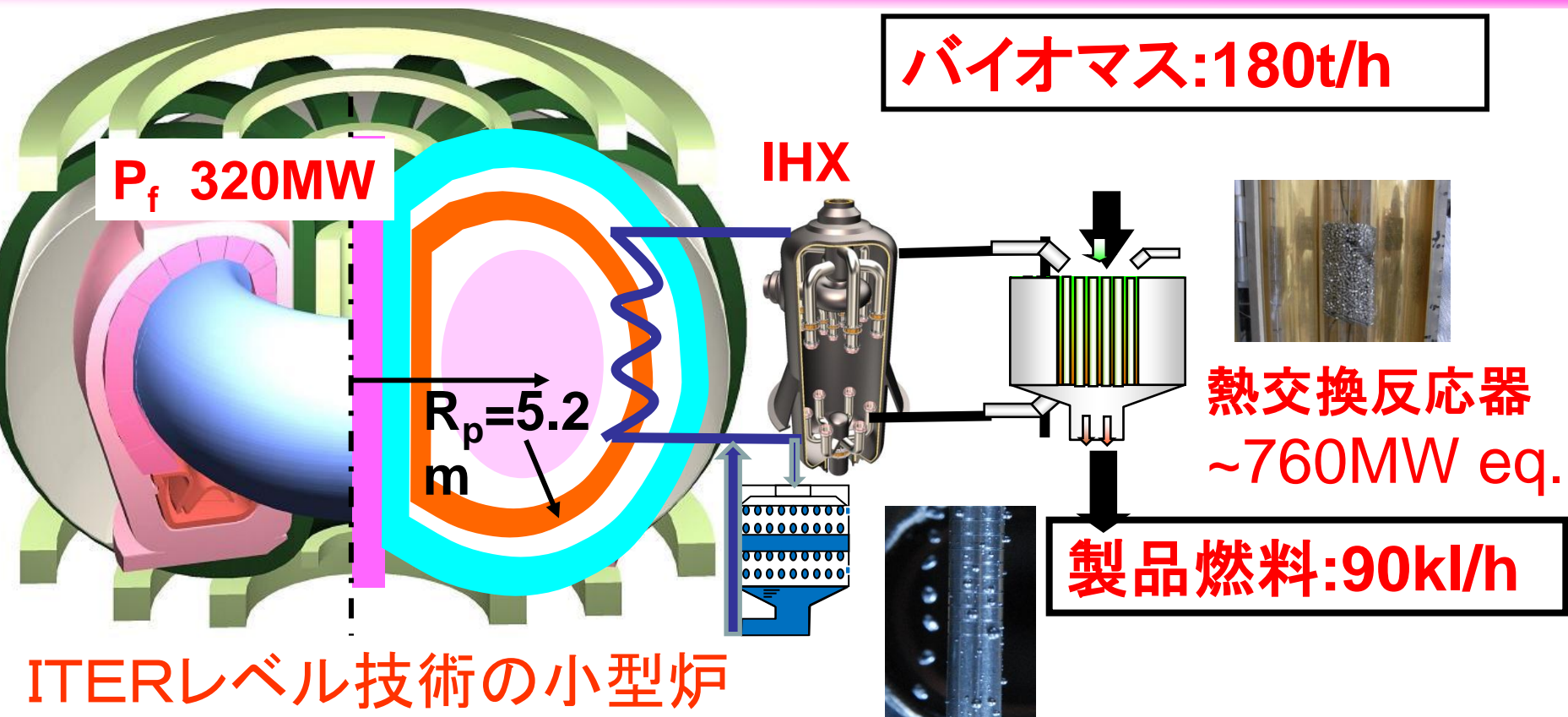
Automobile



Aircraft



乗用車は電気でも走るが。。。

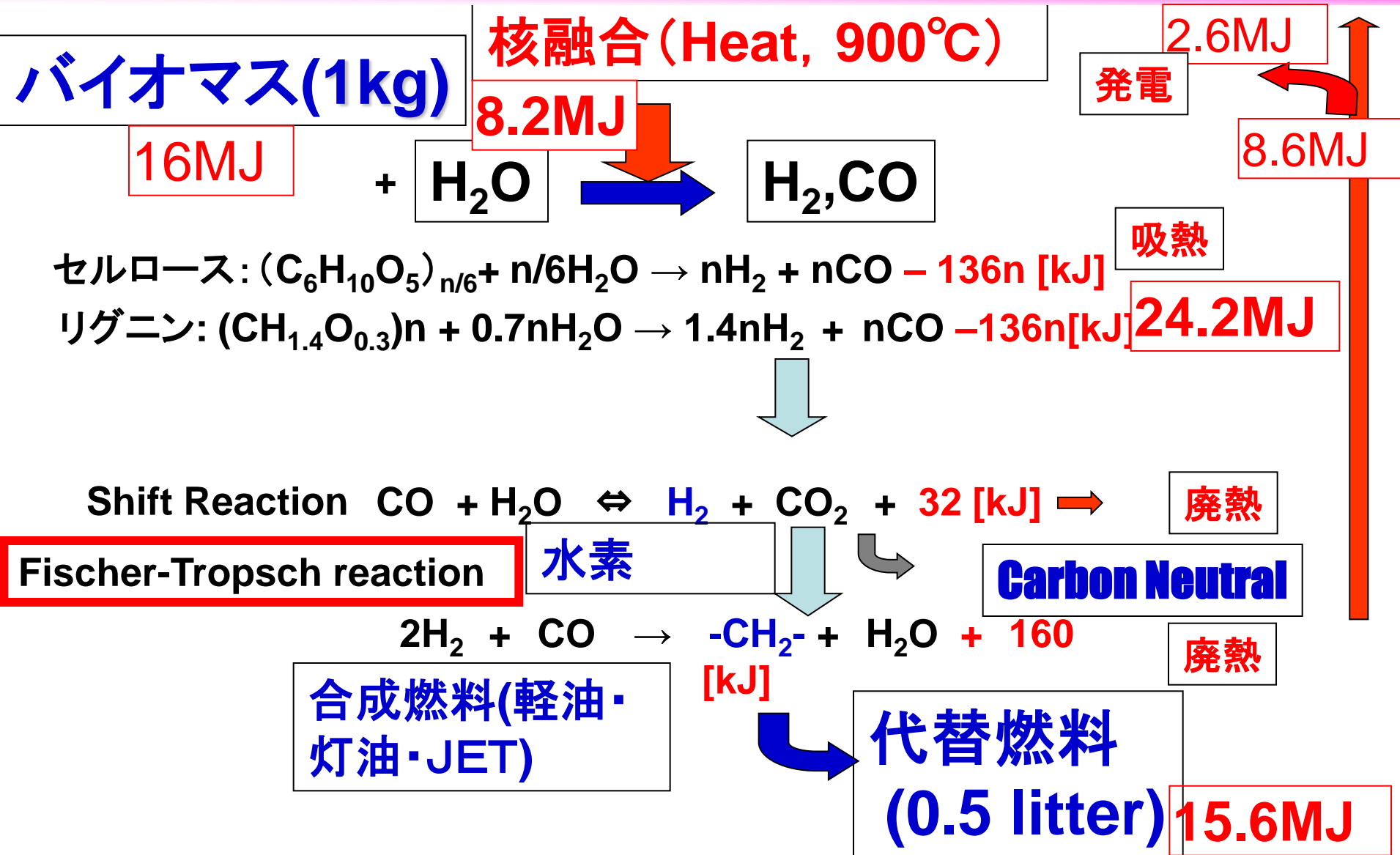


- 本研究全体では、小型小出力でITERと同レベルのプラズマ性能のトカマクの核融合エネルギー発生実証可能性を検討する。
- バイオマス吸熱反応による燃料生成プラントのトリチウムシステムの概念設計を行い、問題点を検討した。



# 核融合によるバイオマス燃料合成

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



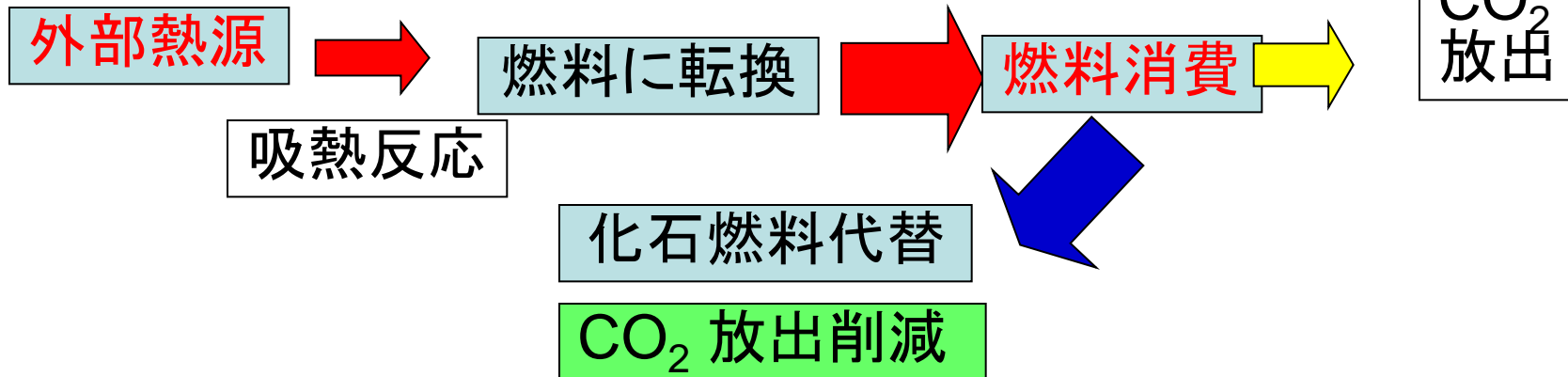
## 大量の廃棄物バイオマスが捨てられている

- 「燃えるごみ」
- 農産廃物
- 林産廃物
- 産業廃棄物(廃材)

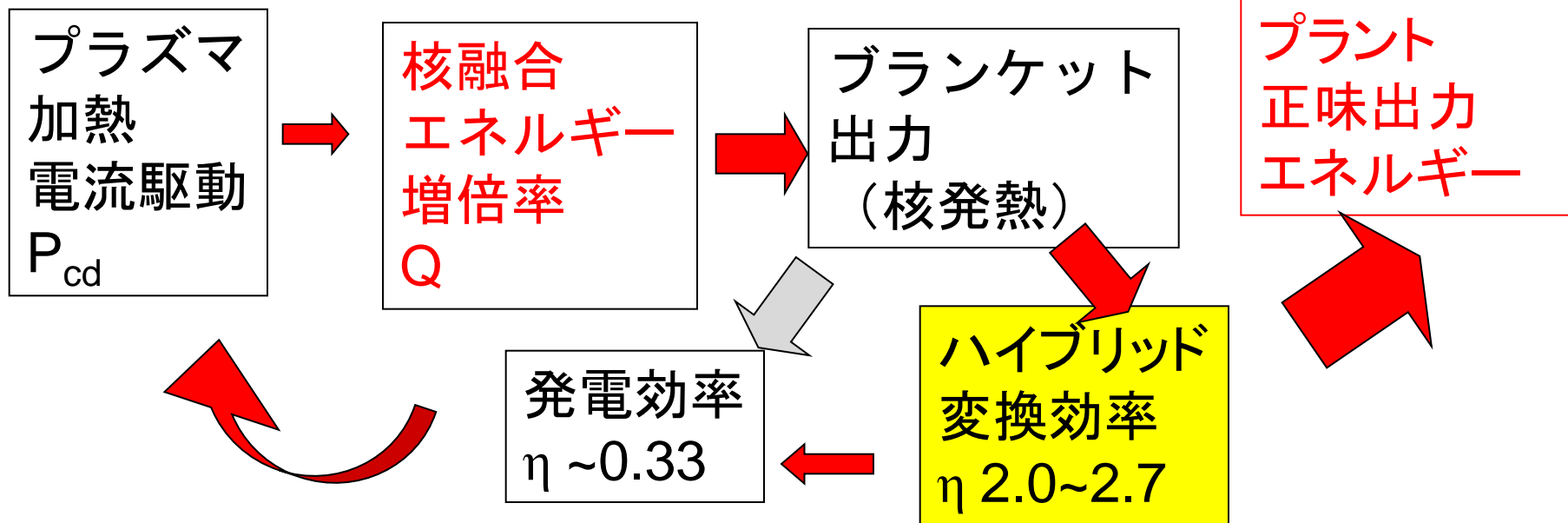
都市でも田舎でも発生  
先進国でも途上国でも発生

「カーボンニュートラル」

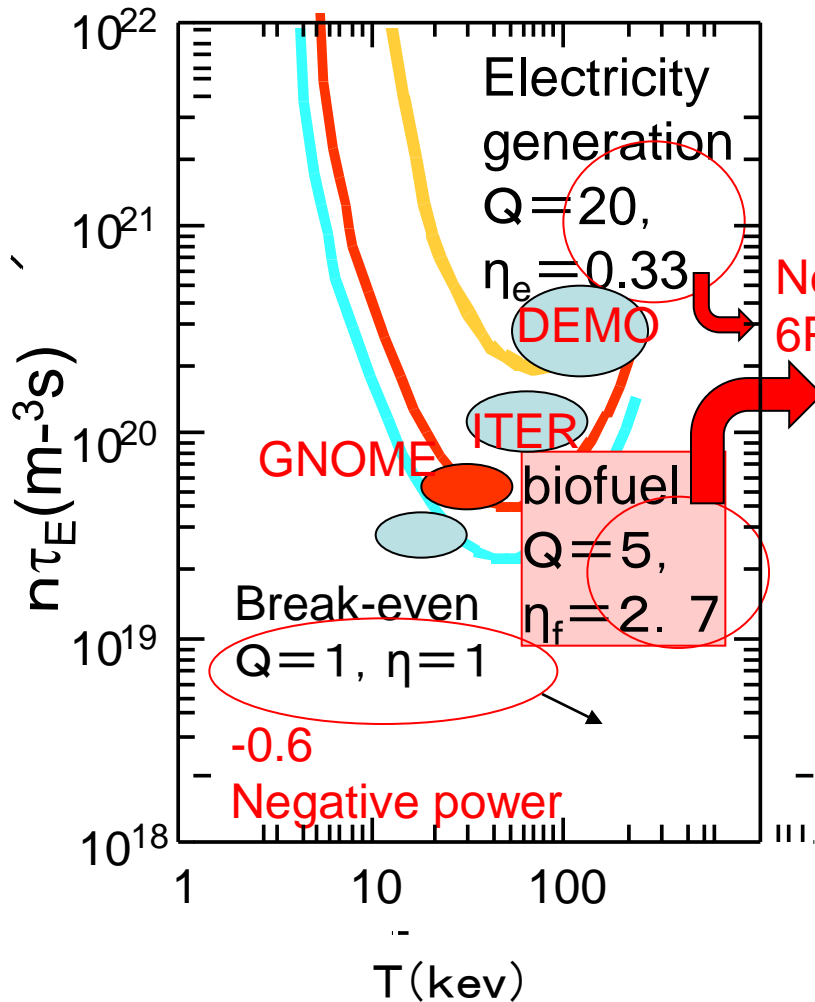
埋め立て・焼却



廃棄物を燃料化すれば、二酸化炭素を出さず、  
石油を節約し、  
燃料を自給し、.....廃棄物も減る。



- 大きな  $Q (>20)$  が **原型炉に必要**なのは、発電効率が低いため
- 核融合エネルギーを発電でなく燃料製造に利用すれば、 **$Q \sim 5$ のプラズマ**で正味のエネルギーを取り出すことが可能



●  $Q > 20$ ではなくITERレベル以下でエネルギー発生

➡ 早期実用化可能

● 電力ではなく、石油代替による燃料を製造

➡ 電力より大きな市場

➡ 太陽光、風力、軽水炉  
原子力では不可能

➡ 二酸化炭素削減効果





## 1. 研究の狙い

1. 炉設計から見て今妥当な目標は？
  - ITER前の状況で発電炉が構想できるか？
  - $Q > 20$ は可能か？必要か？
  - 大出力炉～3GWは必要か？
2. 社会的に、核融合の市場はどこにあるか？
  - 発電に(それも大型で安定性の約束できない、起動が容易でない)どの程度の受容性があるか？



技術に基づく炉設計



市場をみた戦略

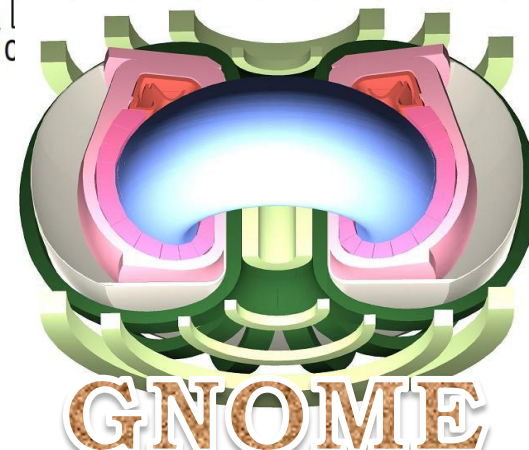
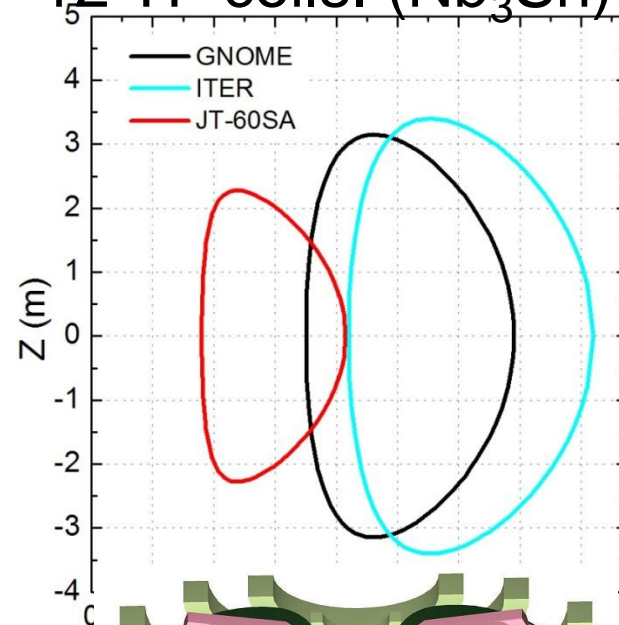
## 2. 技術開発課題

1. 早期エネルギー実証の見込める概念
  - 実験に基づくブランケット、ダイバータの開発
2. 安全性
  - 圧力、トリチウム

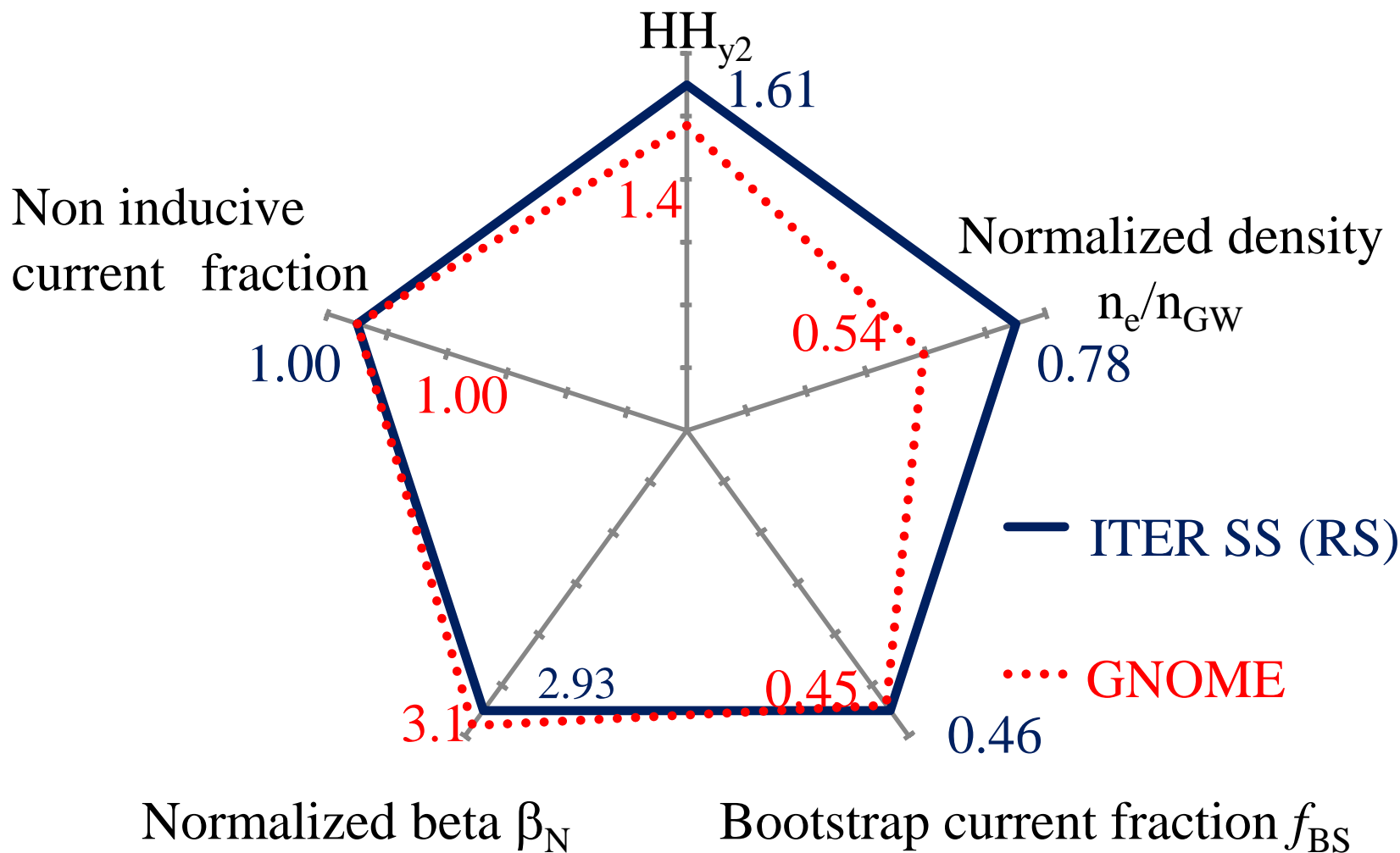
# GNOME parameter

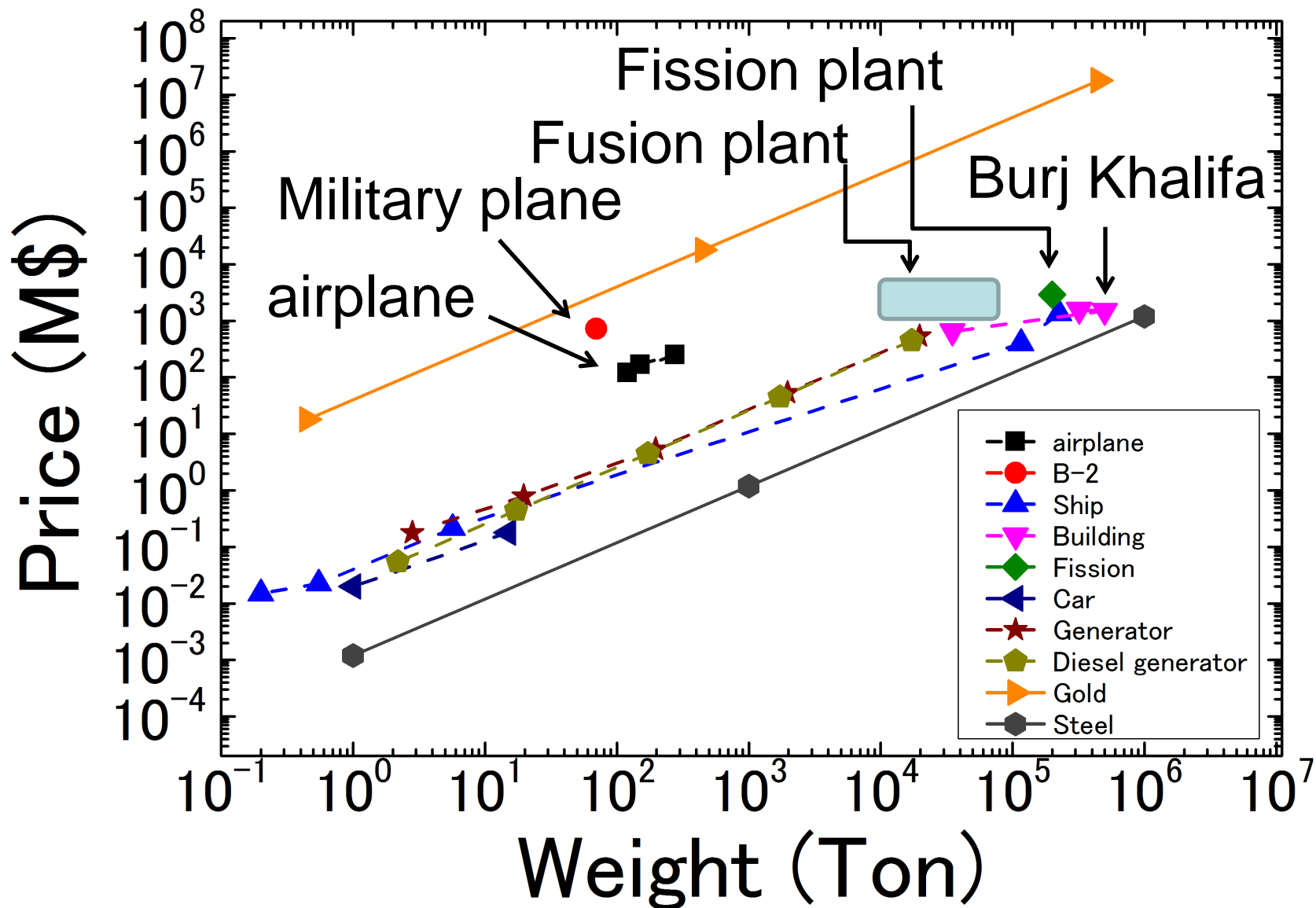
		ITER	GNOME
Major radius	$R_p$	6.2 m	5.2 m
Aspect ratio	$A$	3.1	3.1
Current	$I_p$	15 MA	10.4 MA
Max field	$B_{\max}$	11.8 T	11 T
Average temperature	$\langle T_e \rangle$	8.9 keV	13 keV
Density	$f_{\text{GW}}$	-	0.54
Bootstrap	$f_{\text{BS}}$	-	0.45
Fusion power	$P_{\text{fus}}$	500 MW	300 - 400 MW
Heating	$P_{\text{CD}}$	73 MW	85 MW
Neutron wall load	$P_n$	0.57 MW/m <sup>2</sup>	~ 0.5 MW/m <sup>2</sup>

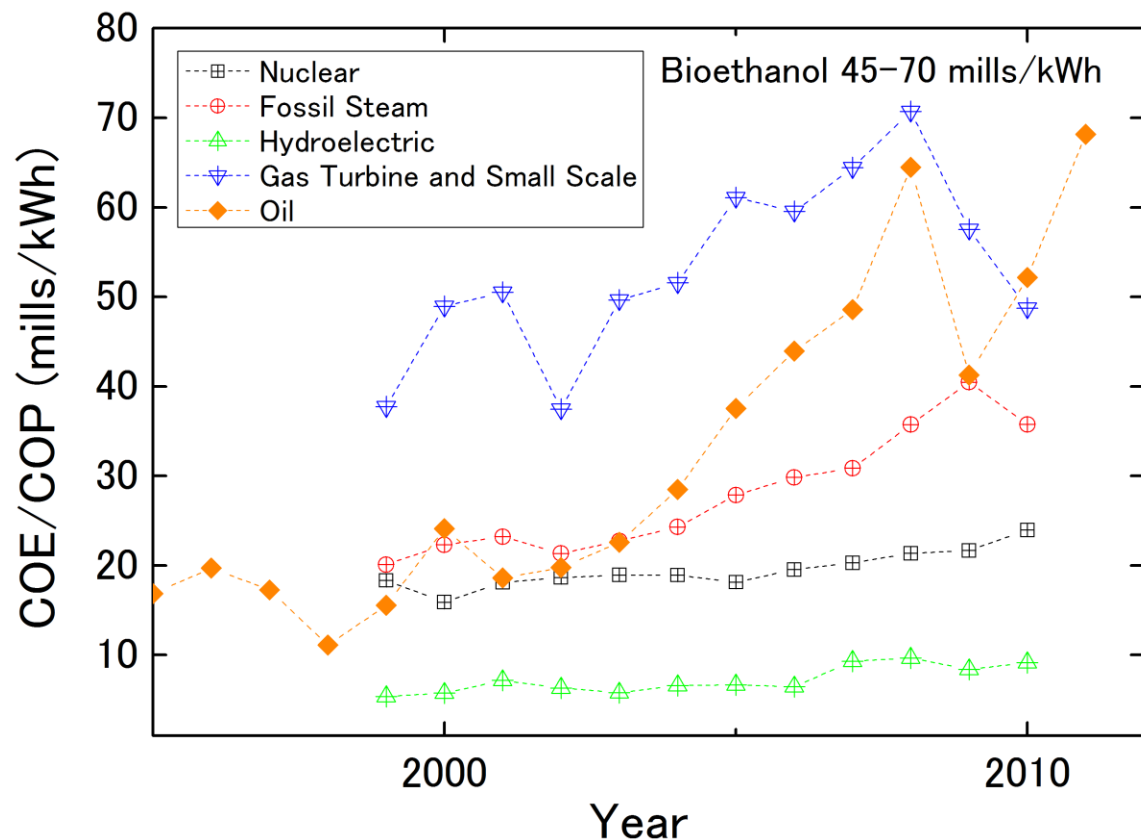
Low power, low-Q.  
Small  $R_p$ .  
12 TF coils. (Nb<sub>3</sub>Sn)



## Confinement improvement







Crude oil

1 gallon = 130 MJ

Bio ethanol

1 gallon = 85.8 MJ

Electricity

1 kWh = 3.6 MJ

All units were converted into mills/kWh.

## エネルギーは相互変換可能な商品

電気は実は燃料より安い！

バイオマスはほぼ完全に  
ガス化することができる

800°C以上の  
高温が必要

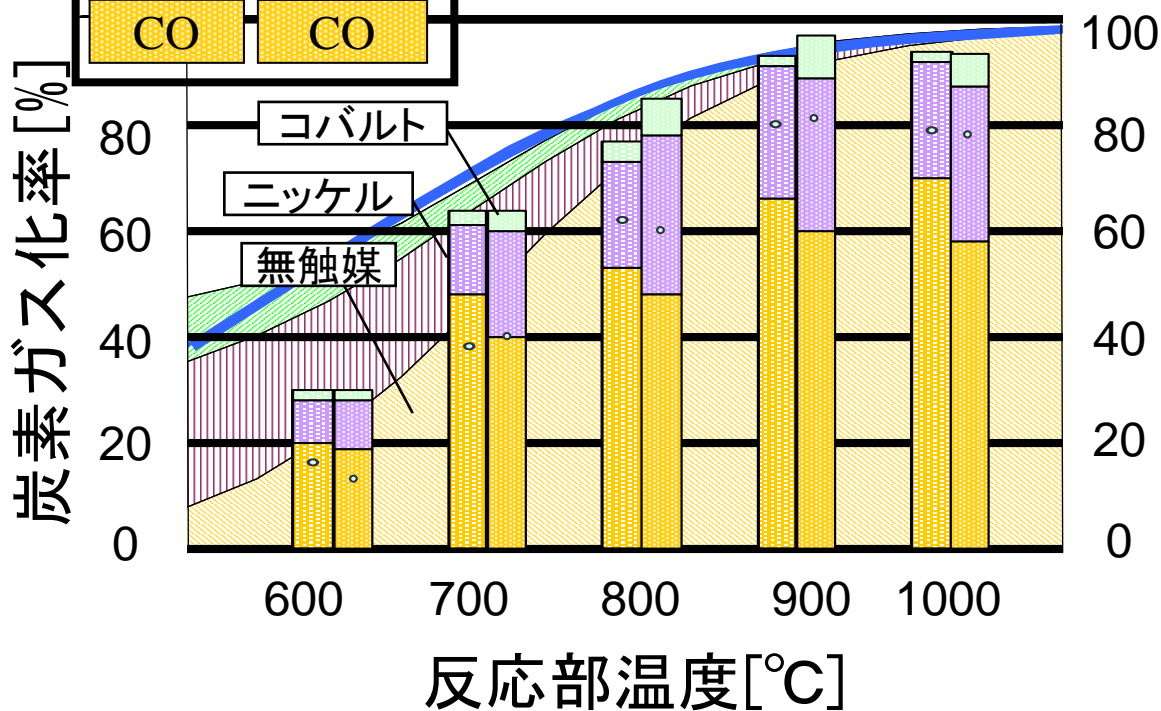
炭素化合物組成

理論

実験

CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
CO	CO

転換率 95%、  
熱効率 97%を達成



反応温度に対するガス化効率の比較

# LiPb 高温試験 >900 ° C

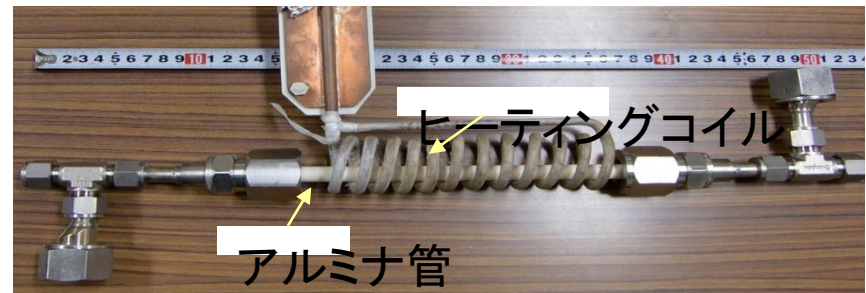
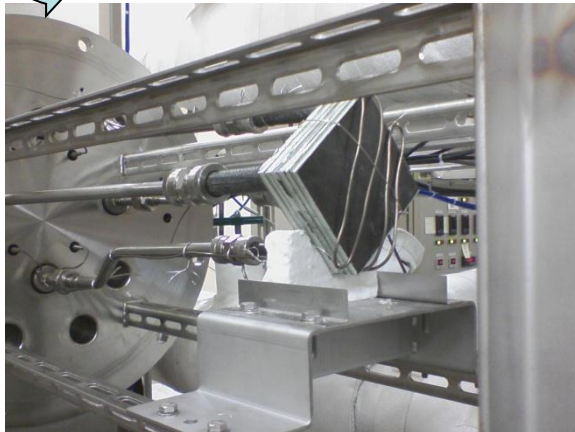


*Institute of Advanced Energy, Kyoto University*



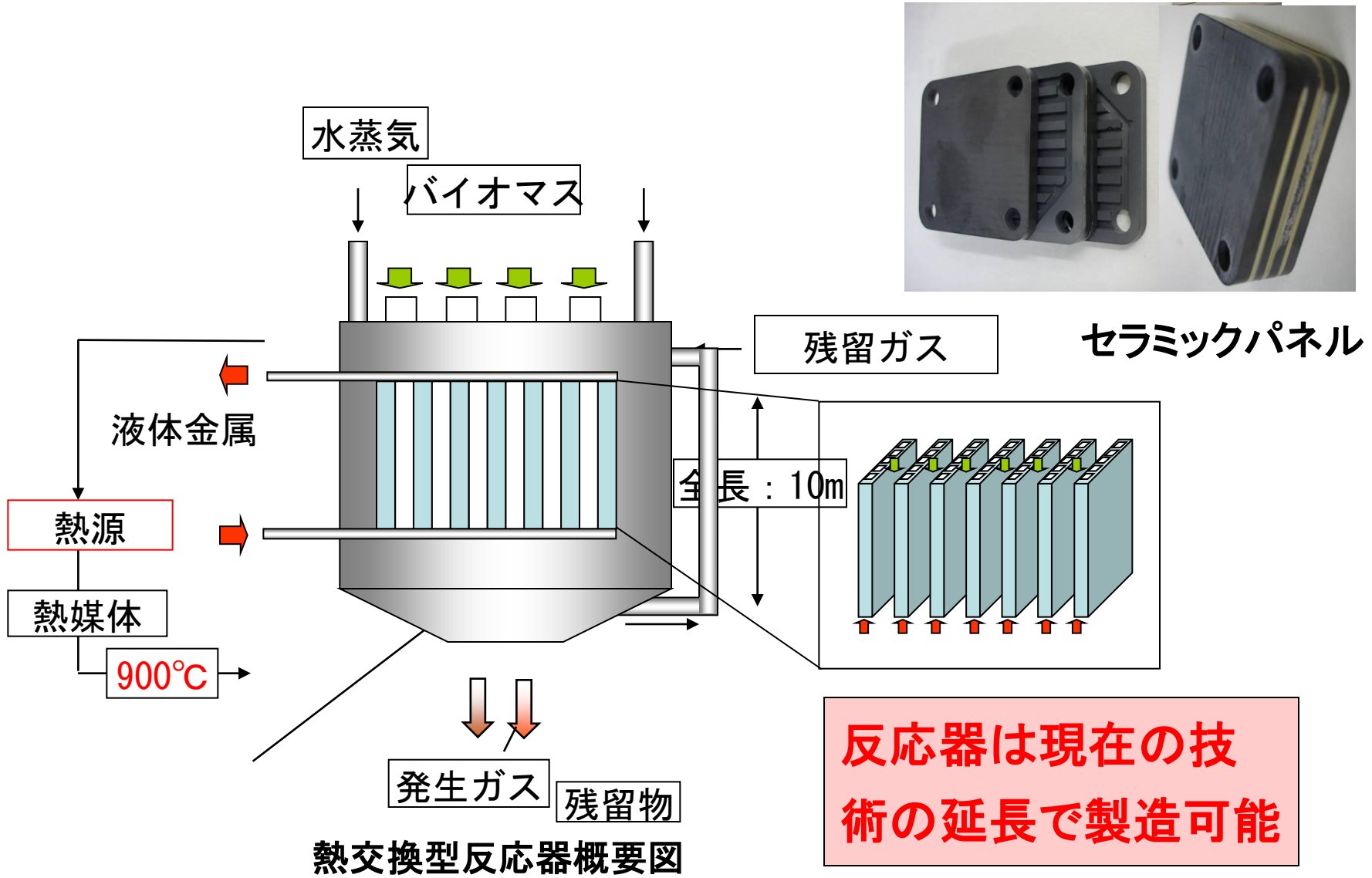
SiC module

Loop operated >900 ° C  
Only in the test vessel



IHX heat transfer from LiPb to He

Installed in 900 ° C vessel

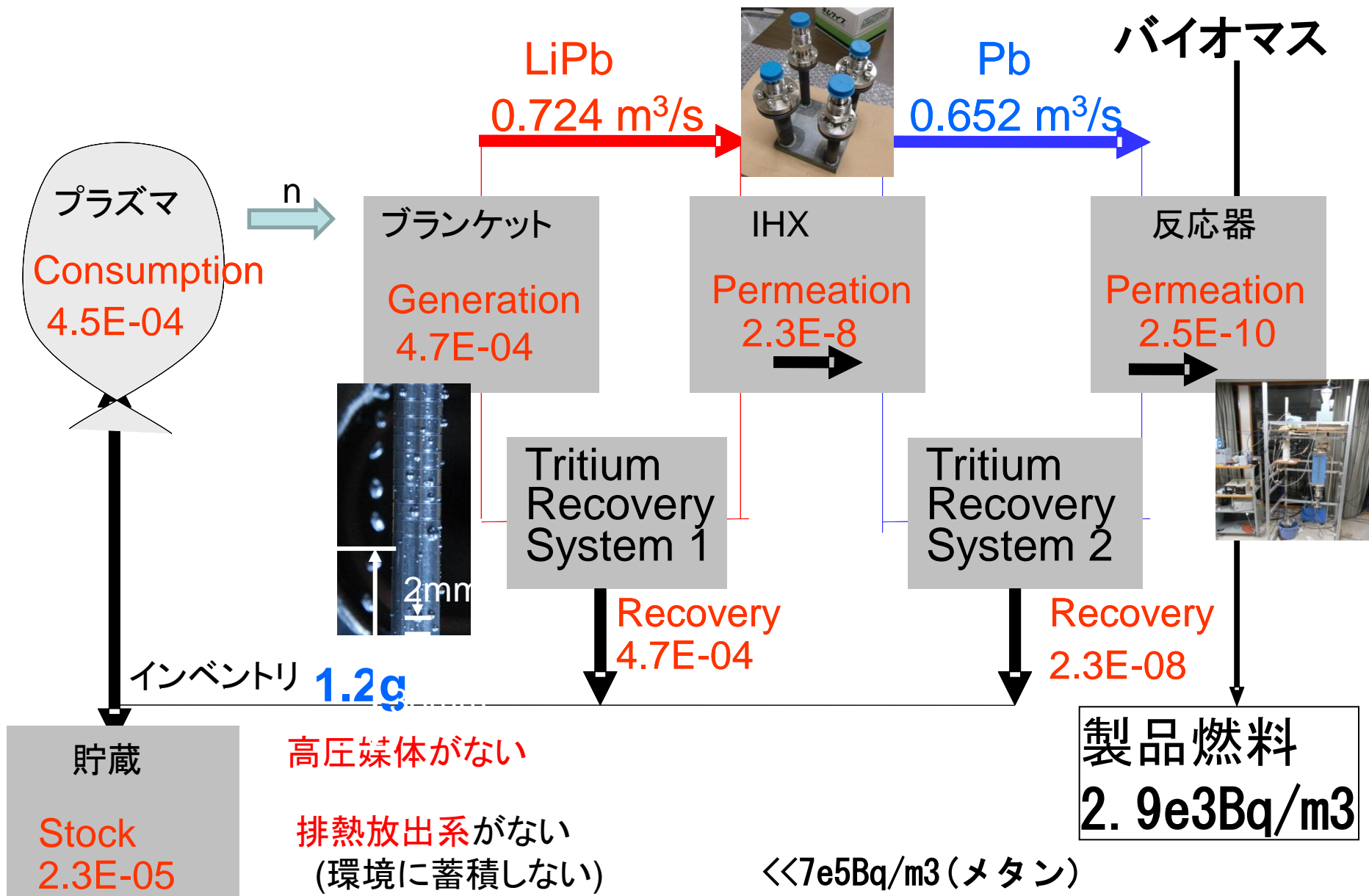


反応器は現在の技術の延長で製造可能





# バイオマス炉のトリチウム安全

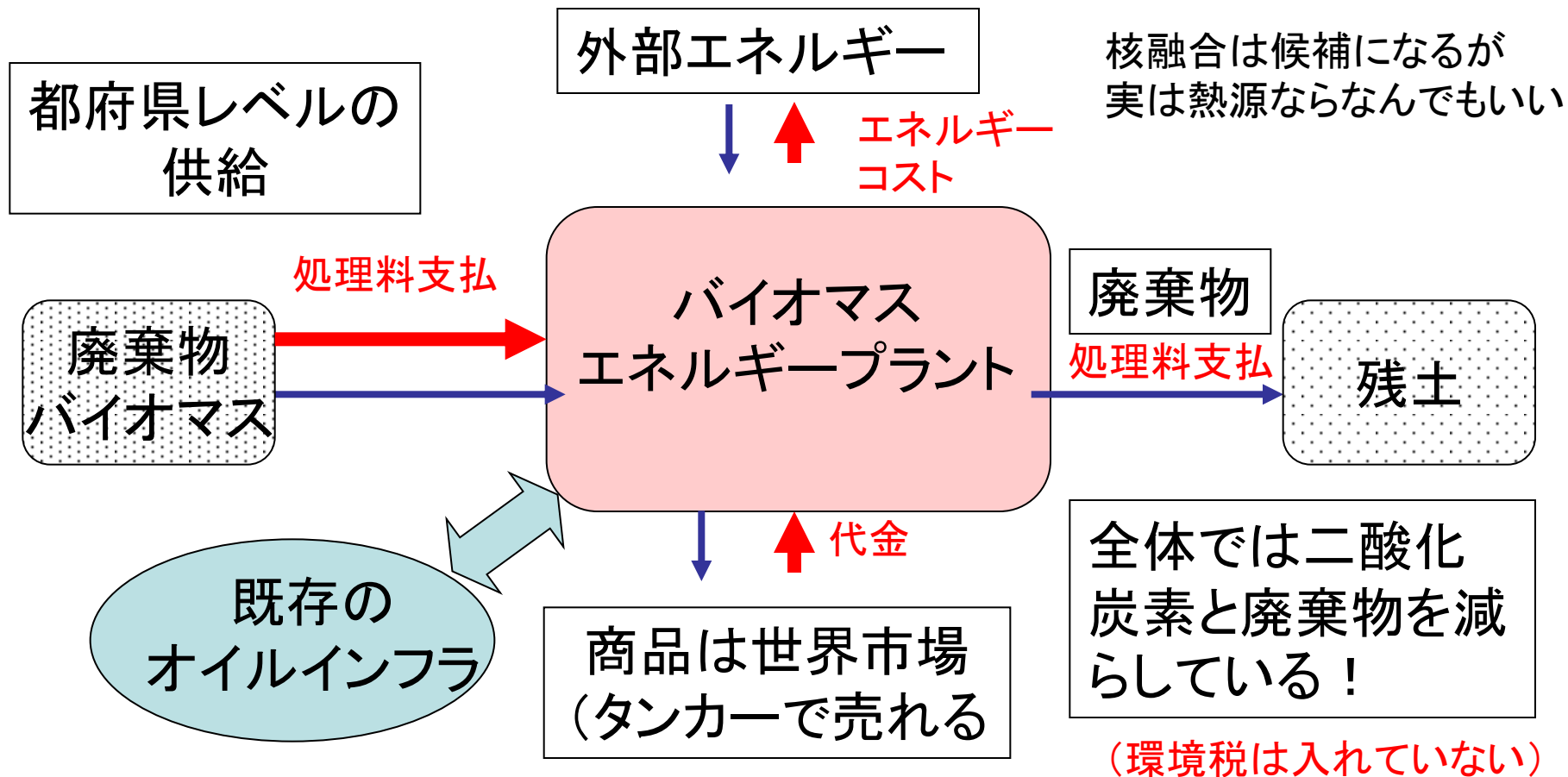
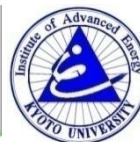




# 廃棄物バイオマス燃料化

Institute of Sustainable Science

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



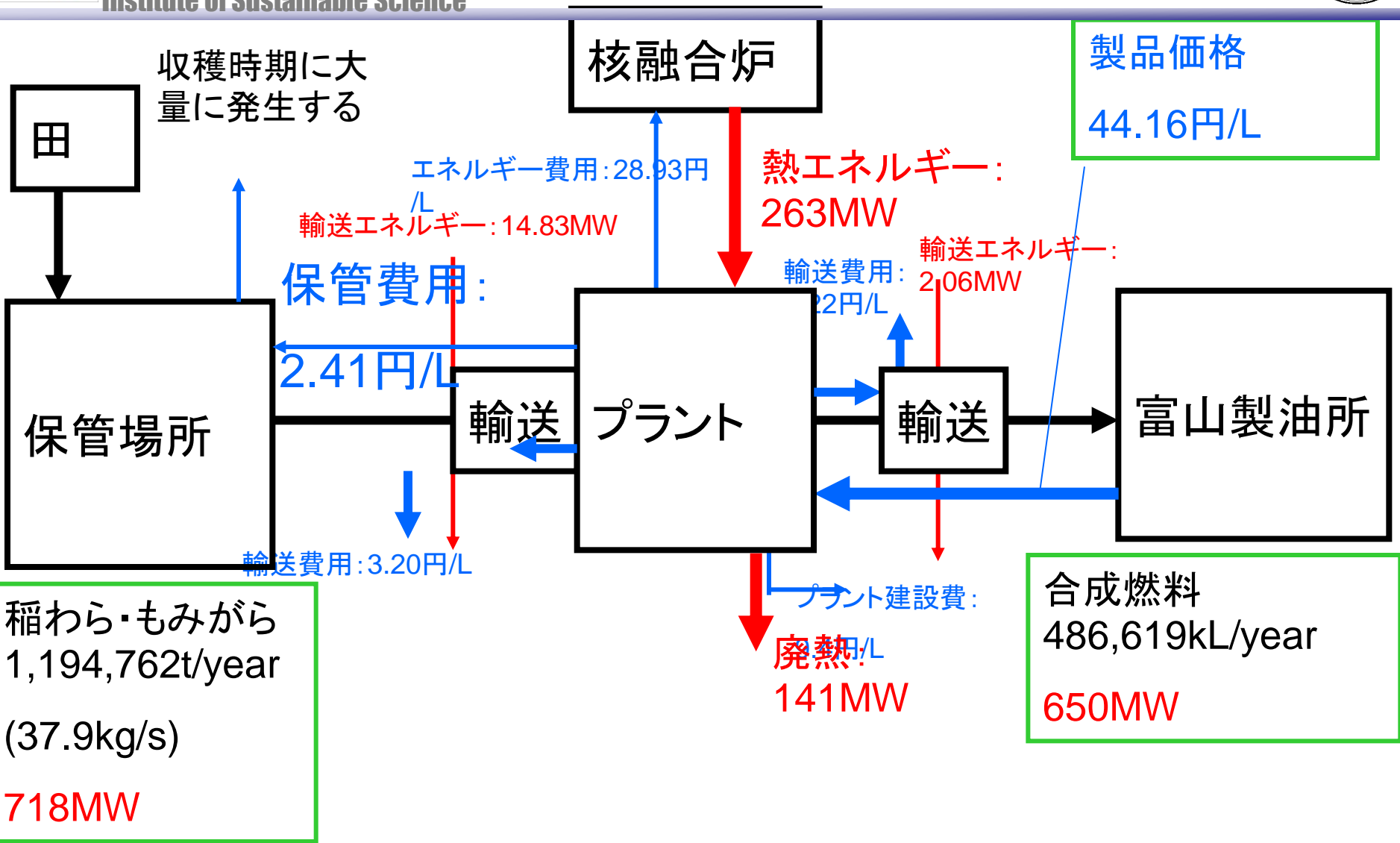
- ・原料資源(もえるごみ)は都市、農村(林業含む)ともに大量発生
- ・概ね都府県レベルの供給→運輸軽油がちょうど自給できるくらい
- ・製品はより長距離の輸送、分配が可能(世界商品)

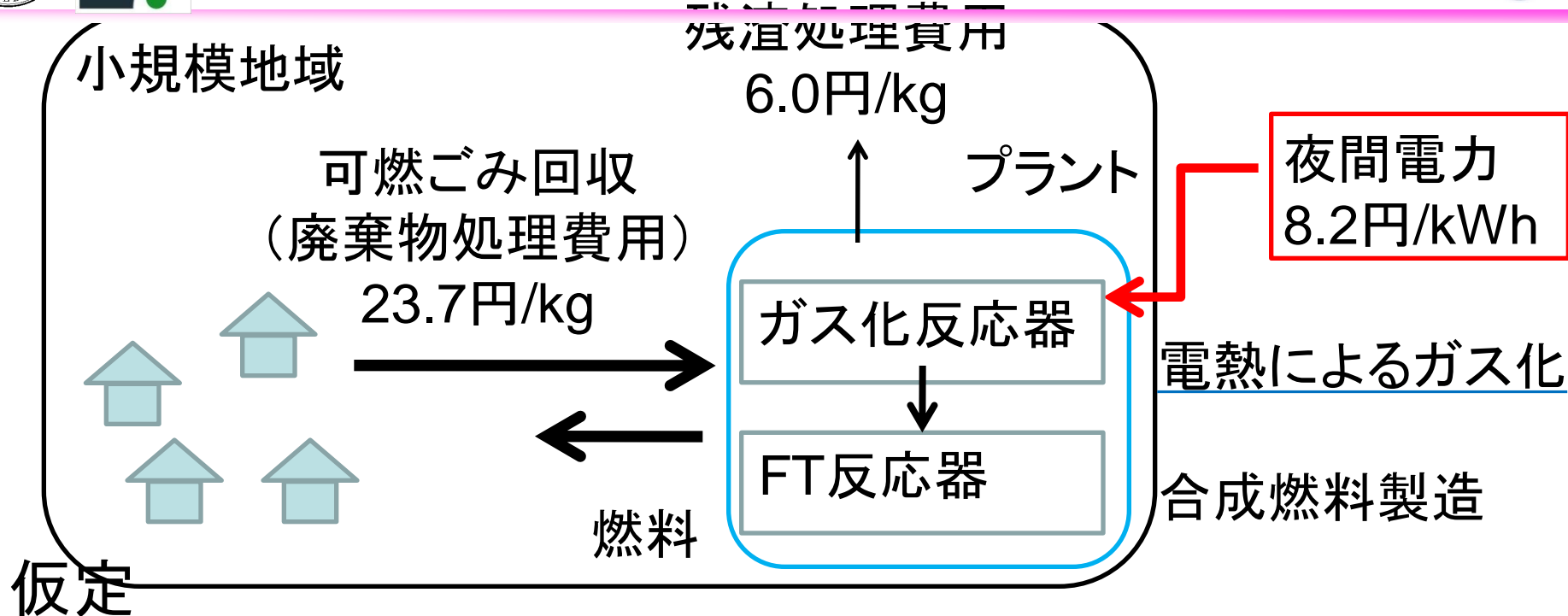


# 稲わら・もみがらを用いた燃料製造フロー分析



Institute of Sustainable Science





プラントコスト=5800億円 × (1日の燃料製造量 / 3180万L)<sup>0.6</sup>

生成ガスは合成燃料になるまで繰り返し投入 → FT効率100%

FT反応の発熱で蒸気発電し電力供給

総合的なエネルギー・コストより社会に適合するか評価



# エネルギー・コスト分析

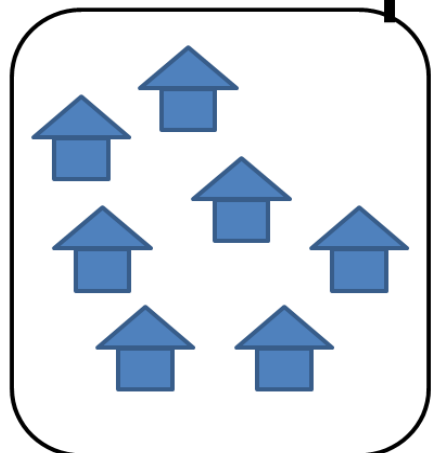
Institute of Sustainable Science

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



燃料消費量  
3.4kl/day

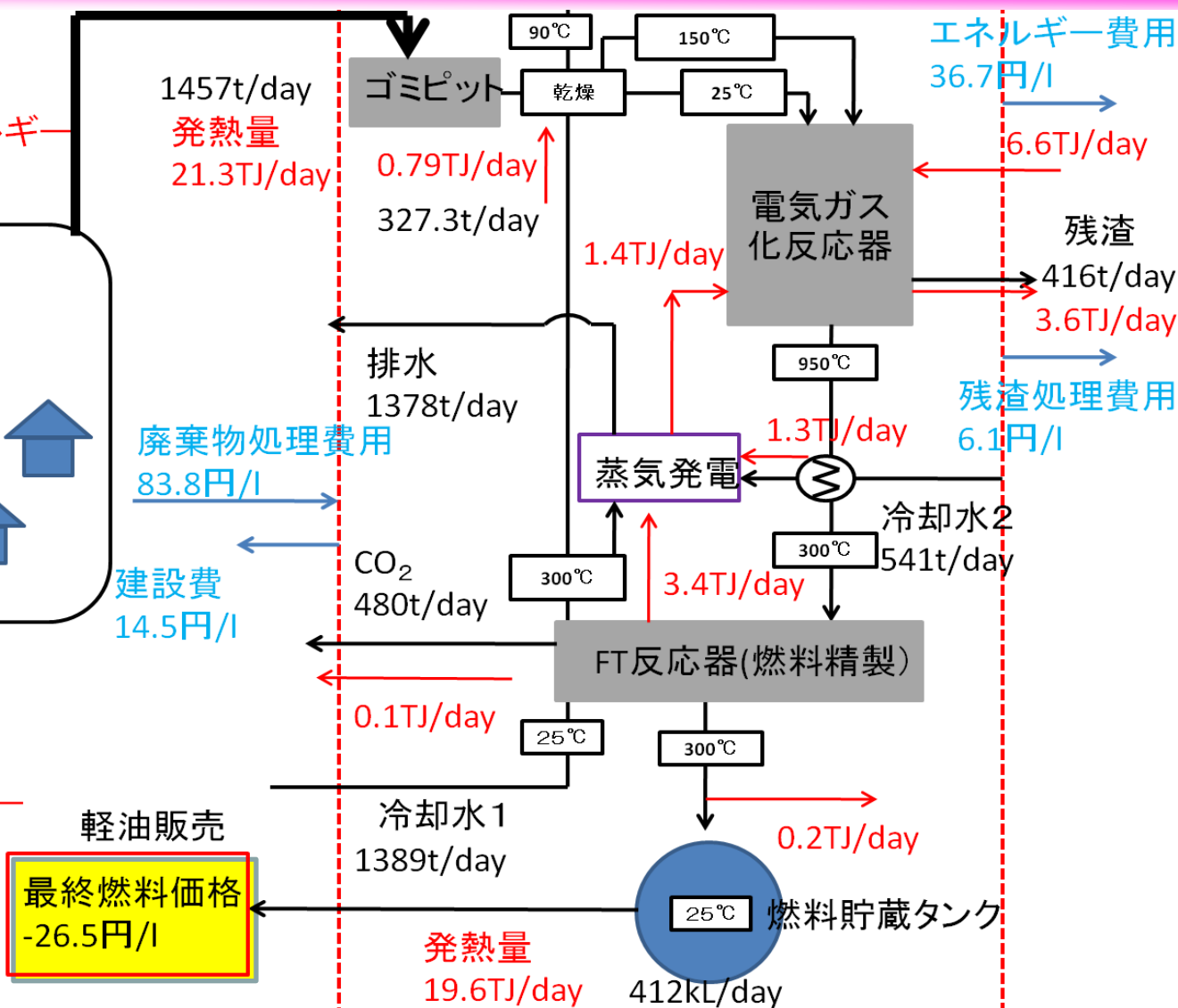
燃料消費エネルギー  
0.16TJ/day



物質フロー

コストフロー

エネルギーフロー



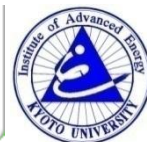
総合的なエネルギー・コストより社会に適合するか評価



# バイオマス源ごとの概念設計まとめ

Institute of Sustainable Science

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



	可燃ごみ	木質産廃	農産廃物	林産廃物
製品コスト(JPY/L)	-51.6	-42.66	44.16	50.1
発生量(t/year)	7,746,000	267,000	1,195,000	446,000
軽油生成量(kL/year)	2,045,000	114,000	487,000	191,000S
製造エネルギー(MW)	941	61	263	101
エネルギー増倍率	2.90	2.51	2.47	2.51
総合エネルギー効率	0.70	0.64	0.65	0.63

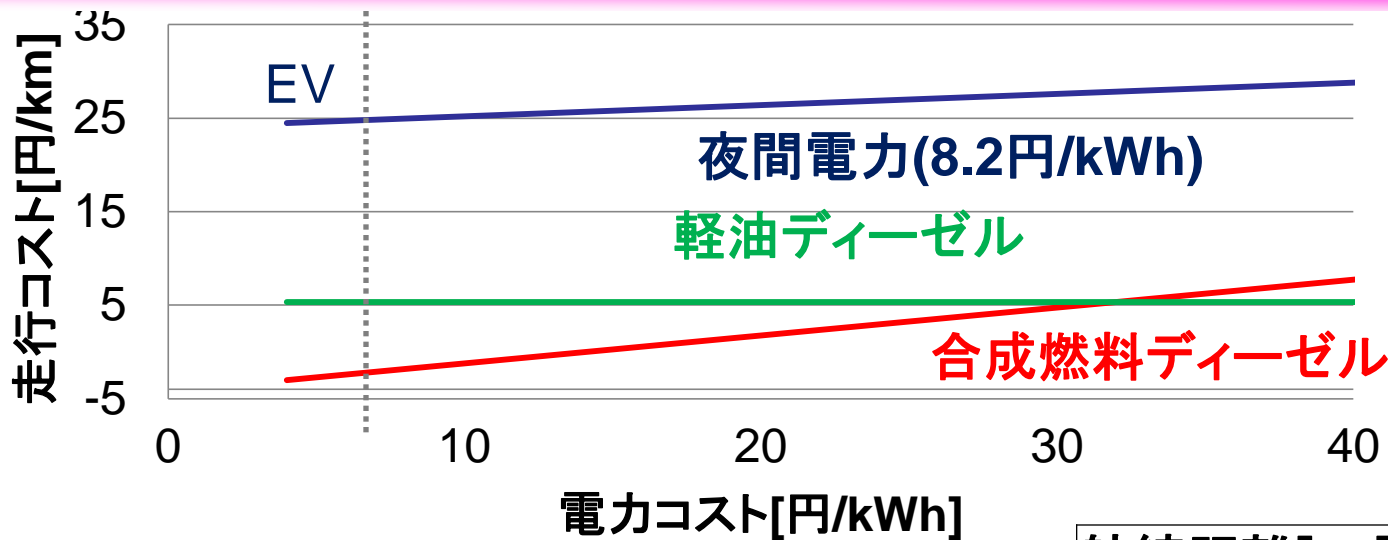
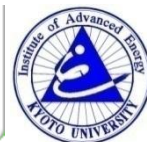
- ・エネルギー増倍率 = 製品油の発熱量 / 外部加熱量
- ・総合エネルギー効率 = 製品油の発熱量 / 原料エネルギー



# 自動車動力源の走行コスト比較

Institute of Sustainable Science

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



燃料製造地域  
京都市

ディーゼル燃費  
15km/L

電気自動車

合成燃料ディーゼル走行コスト  
-1.8[¥/km](夜間電力)

航続距離[km]	200
電池容量[kWh]	24
電池コスト[万円/kWh]	10
走行距離[万km]	10

電気自動車以下の走行コスト

・電力コスト 32円/kWh以上  
軽油ディーゼル以上の走行コスト

・電力により燃料製造し、エンジン駆動の方がコスト的に有利となる条件がある





# 国内需給合計



	可燃ごみ	農産廃物	林産廃物	木質産廃
廃棄物発生量(t/year)	38,067,000	14,650, 000	2,068, 000	1,497, 000
製造可能軽油量 (kL/year)	8,992, 000	4,819, 000	714, 000	517, 000

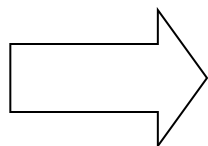
Diesel total: **15,000,000kL/year**

	航空用	灯油	軽油
軽油・灯油需要 (kL/year)	5,324,600	(24,382,000)	36,323,000

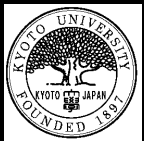
輸送セクター需要合計: **42,000,000kL/year**

・36% の需要が国産可能

その分の二酸化炭素が出ない、石油輸入不要



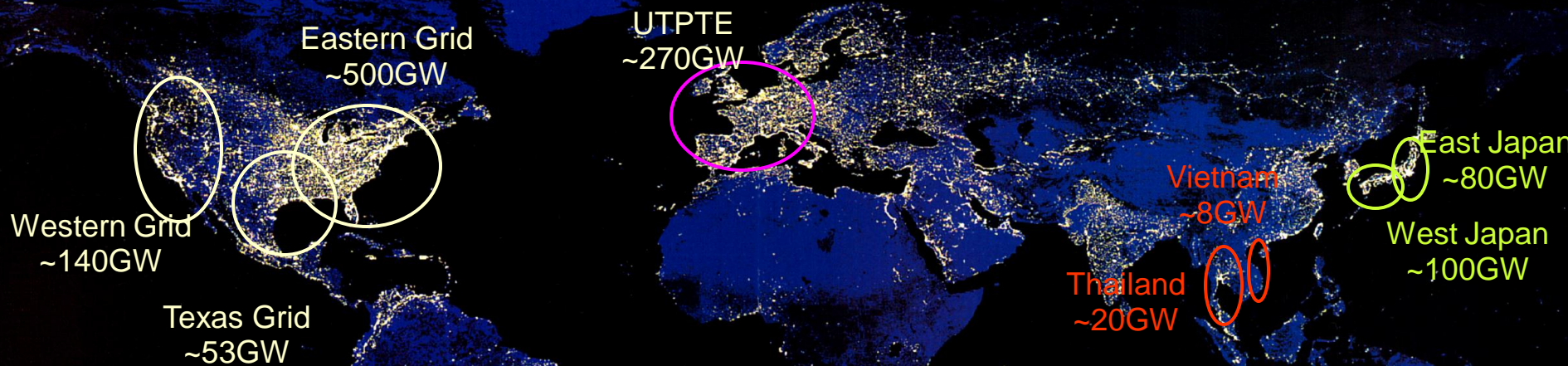
# 電力システムについて



Institute of Sustainable Science

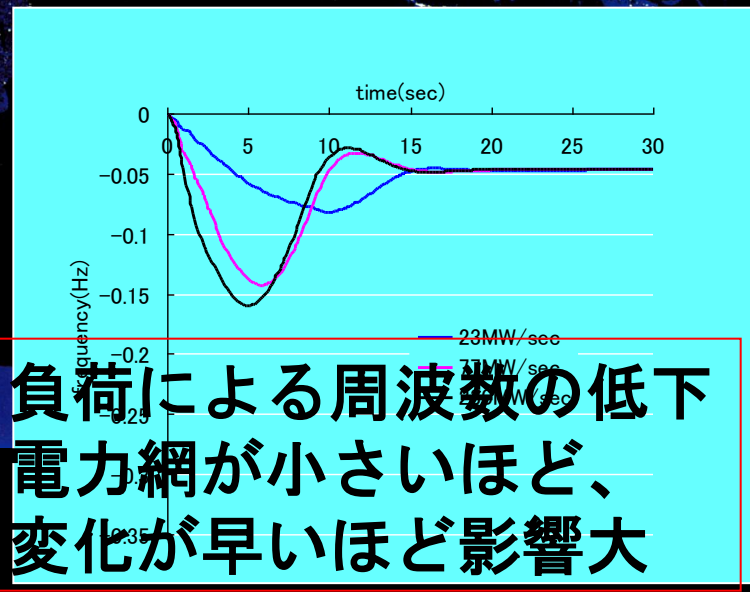


Institute of Advanced Energy, Kyoto University

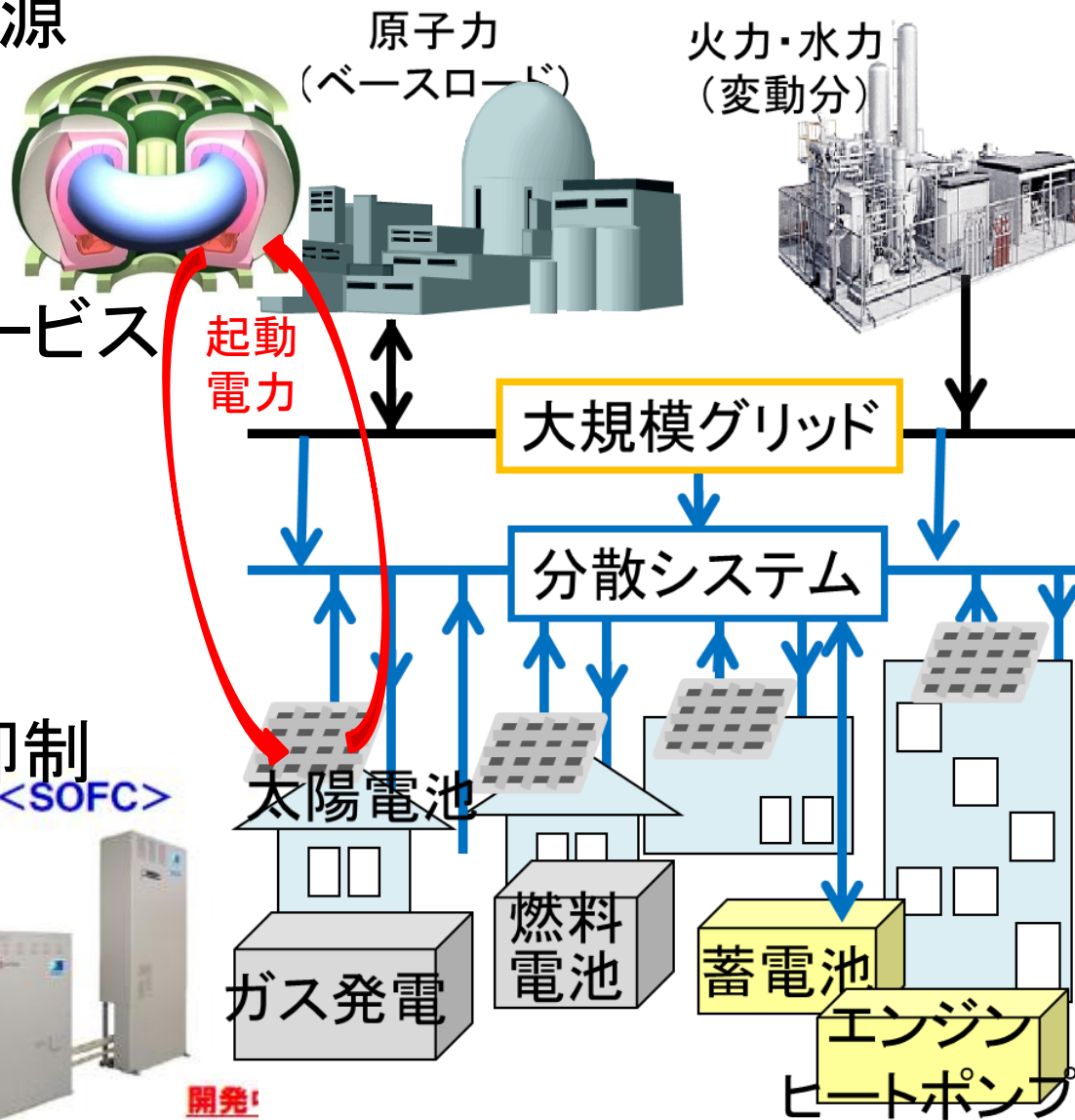


巨大で整備された電力網(グリッド)は先進国固有 —それでも最近は大規模停電が頻発: 需給ひっ迫、再生エネ核融合を電源として入れられるグリッドは極めて少ない

電力は国家セキュリティの問題。今後大規模化するかは疑問



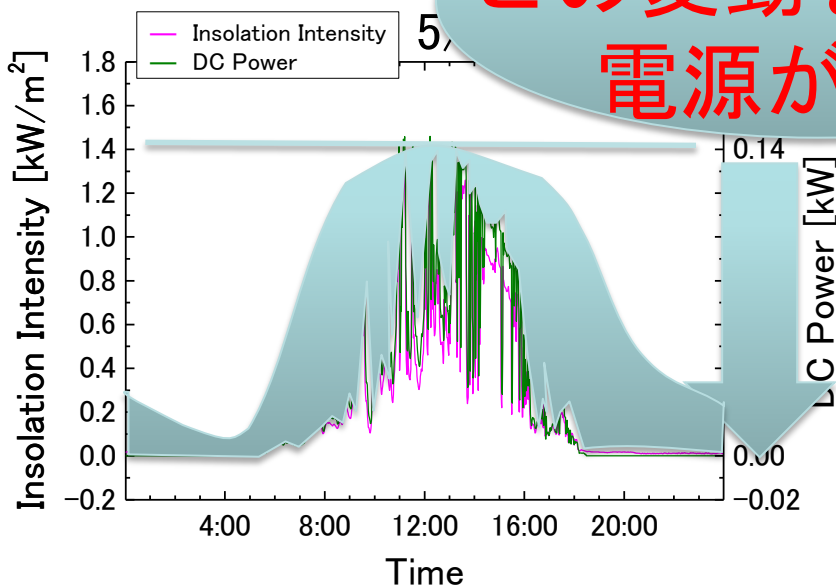
- 消費者による自家用電源
- ピーク時に自家発電
  - 消費者の自衛
  - 医療・福祉・教育・サービス等への電力供給
- 非常用電源、防災効果



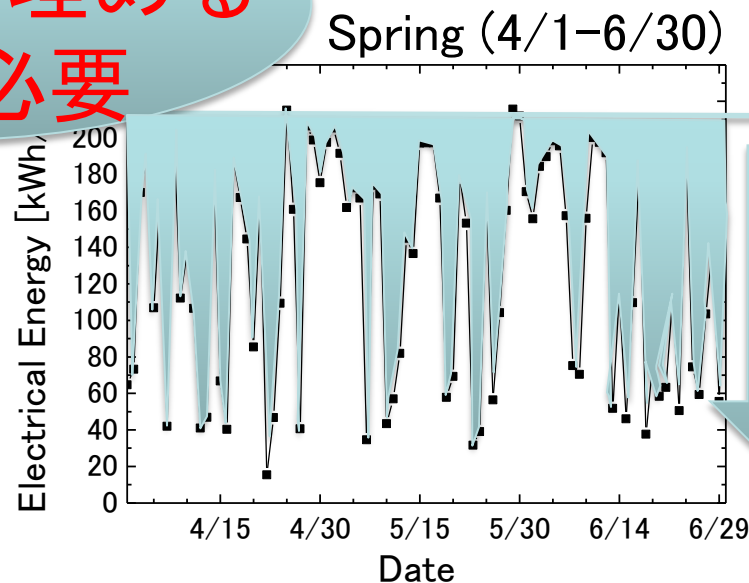
- 再生可能電源の変動抑制
- 電源の多様化、分散化
  - 燃料電池に

低炭素燃料が必要

この変動を埋める  
電源が必要



太陽光発電の一日内の変化



太陽光発電の一日ごとの変化

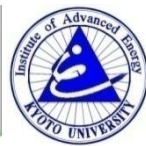
- ・太陽光・風力の変動は一日の中、季節の中で非常に大きい
- ・変化は、数秒で起こる。
- ・変動分の総量を吸収できるような制御電源(蓄電池等)が必要
- ・火力発電は比較的ゆっくりしか対応できない。



# 炭素を出さない電力供給

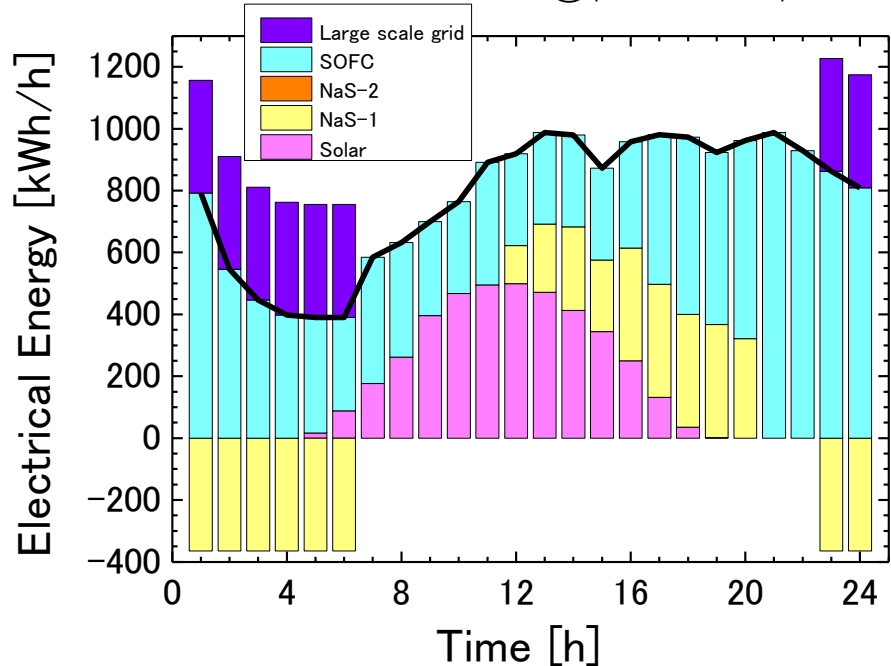
Institute of Sustainable Science

Institute of Advanced Energy, Kyoto University

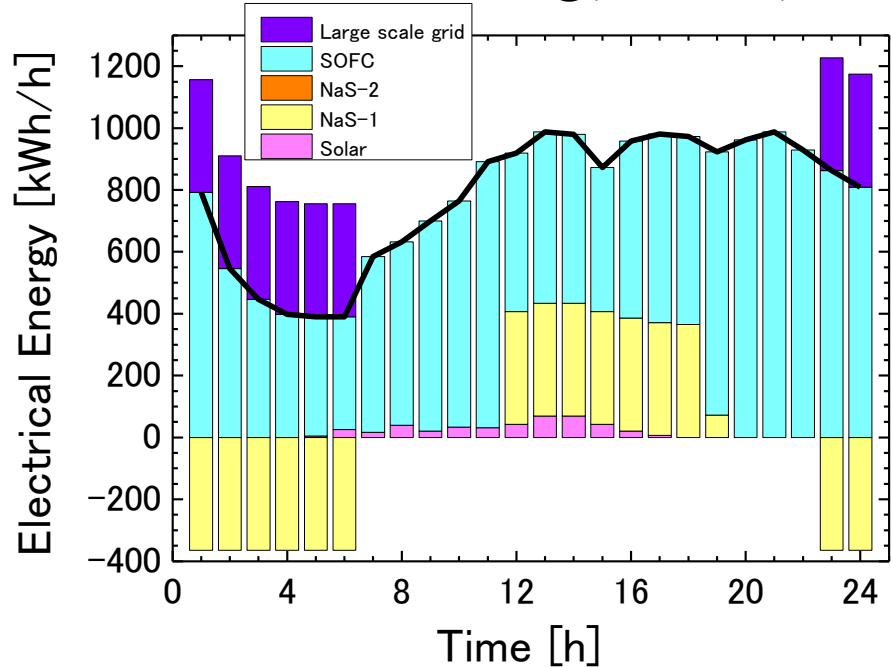


	出力[kW]	最大出力[kW]	容量[kWh]	個数	面積[m <sup>2</sup> ]	体積[m <sup>3</sup> ]
太陽電池	633	566.2	-	-	4740	-
蓄電池	364.7	420	2625	7	-	16.7
燃料電池	-	988	-	-	-	5.6
計	998	1974	2625	7	4740	22.2

SOFC+NaS+Solar①, Summer, Fine

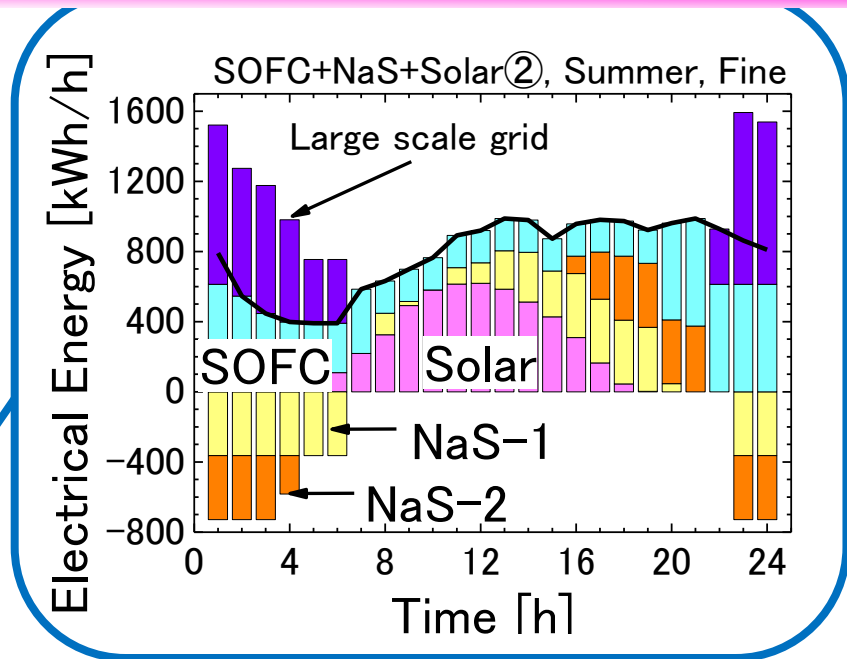
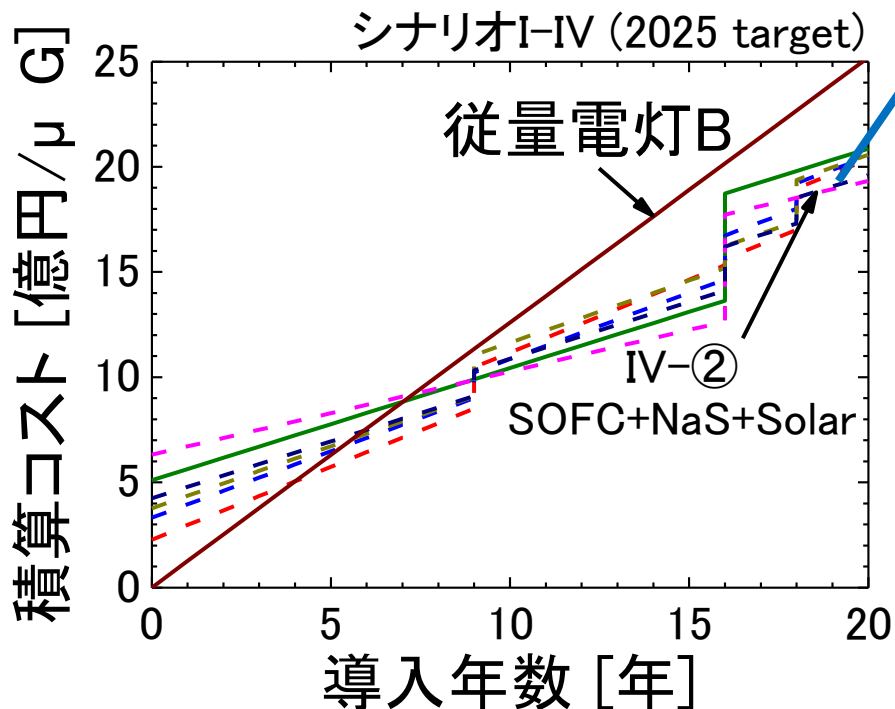


SOFC+NaS+Solar①, Summer, Rain



## 2025年目標コスト(NEDO)の場合

	導入コスト [万円/kW]
SOFC	20
Solar	12
NaS	29



- 導入8年目以降に全てのシナリオで**大規模システムからの受電よりも安価**となる
- 複数の電源を組み合わせることで、**システムの負荷平準化**と**消費者の低コスト化**を実現



# バイオマス燃料の将来市場

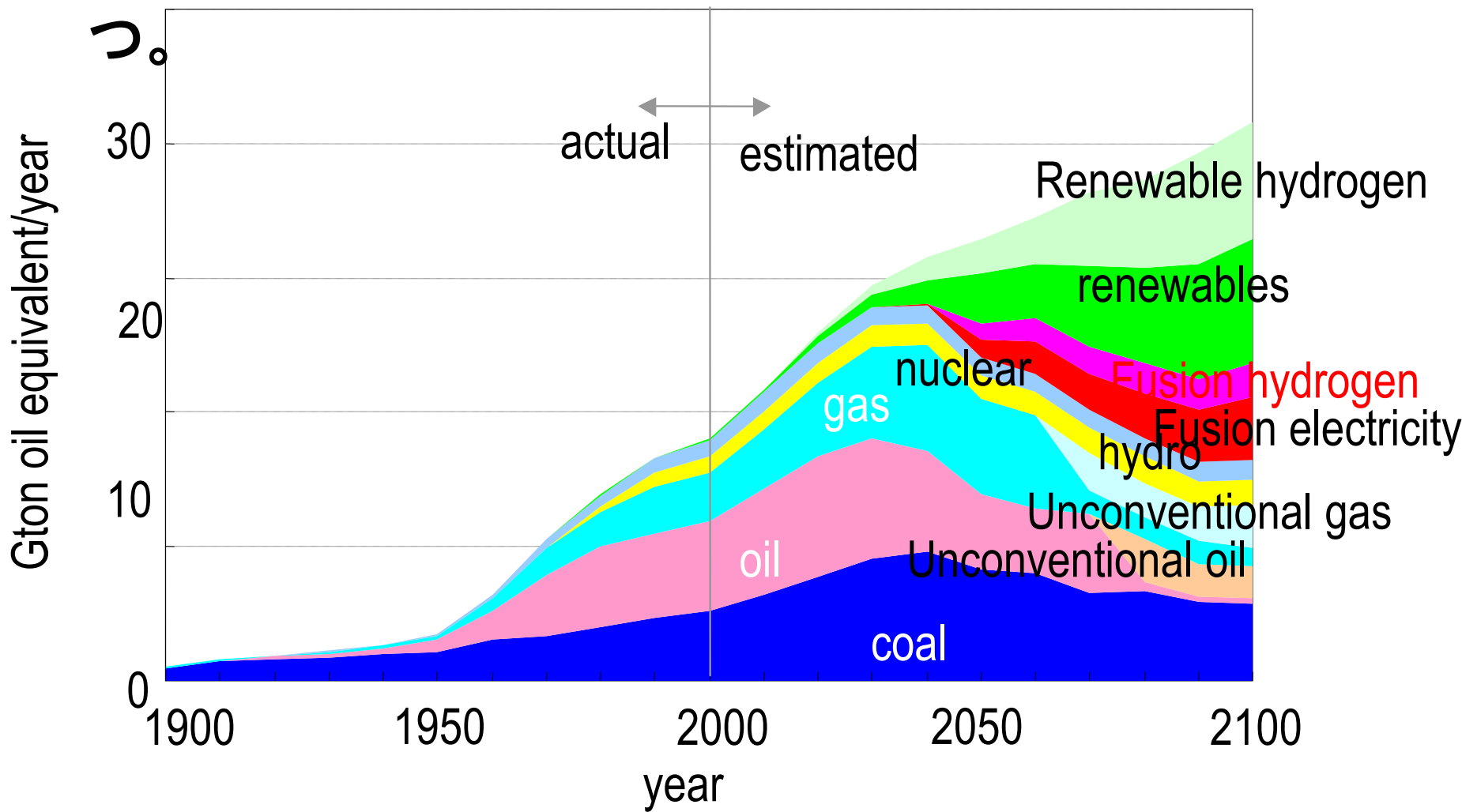
Institute of Sustainable Science

Institute of Advanced Energy, Kyoto University



電力による燃料製造から導入。大きなCO2削減効果

核融合ーバイオマス燃料供給は大きな市場性を持つ。



# 地球再生に向けたエネルギーと核融合



Institute of Sustainable Science

- **核融合エネルギーの位置づけは変わりつつある**
  - ― 地球環境問題
  - ― 資源、電力、途上国需要。 ←核融合は考えているか??
- **ITERのDT燃焼は2027年以降**
  - 核融合の次のステップは、ITERの次?
  - プラズマ性能としてITER以上の数値が当面想定できない
  - 燃焼しても、それで何ができるのか、社会に見せられない
- **核融合エネルギーのために解決すべき課題は多い**
  - ― プラズマ、ディスラプション、ブランケット、ダイバータ。
  - ITER以降までそれらの解決は許されないのか?
  - 産業界、人材の時間ギャップ、途上国の追い上げ。
- **プラズマ核融合はエネルギー環境問題に答えているか??**
  - ― 2050年に導入しても、**出番がない?**
  - 低炭素への要求に答えなくてもよいのか?  
(**二酸化炭素を出さない発電、は答えではない**)
- 「発電」でよいのか? クリーン電力はすでにいろいろある。



# 核融合開発の「プランB」



Institute of Sustainable Science

- ・ **プラズマ核融合**は研究は「**地球環境問題**」に答えていない
  - 状況が変わったのに50年前の目標を追っている？
  - 今必要なのはクリーン電源ではない
    - **二酸化炭素削減量**こそが重要
  - ベースロードよりも分散電源が必要
- ・ 「**プラズマ核融合の可能性**」
  - 人類社会の低炭素化を可能とする数少ないオプション
  - 石油代替燃料を提供
  - エネルギー需要の大きな部分を満たせる
- ・ **考慮すべき主な困難要件**
  - 2050年以降では話にならない
    - **建設時期！！**
    - 本当に怖いのは、ITERが成功しても誰も喜ばないこと
  - プラズマ核融合は常に開発の意義について、現在の社会の要求にあった回答が必要

**代替案を示そう！**

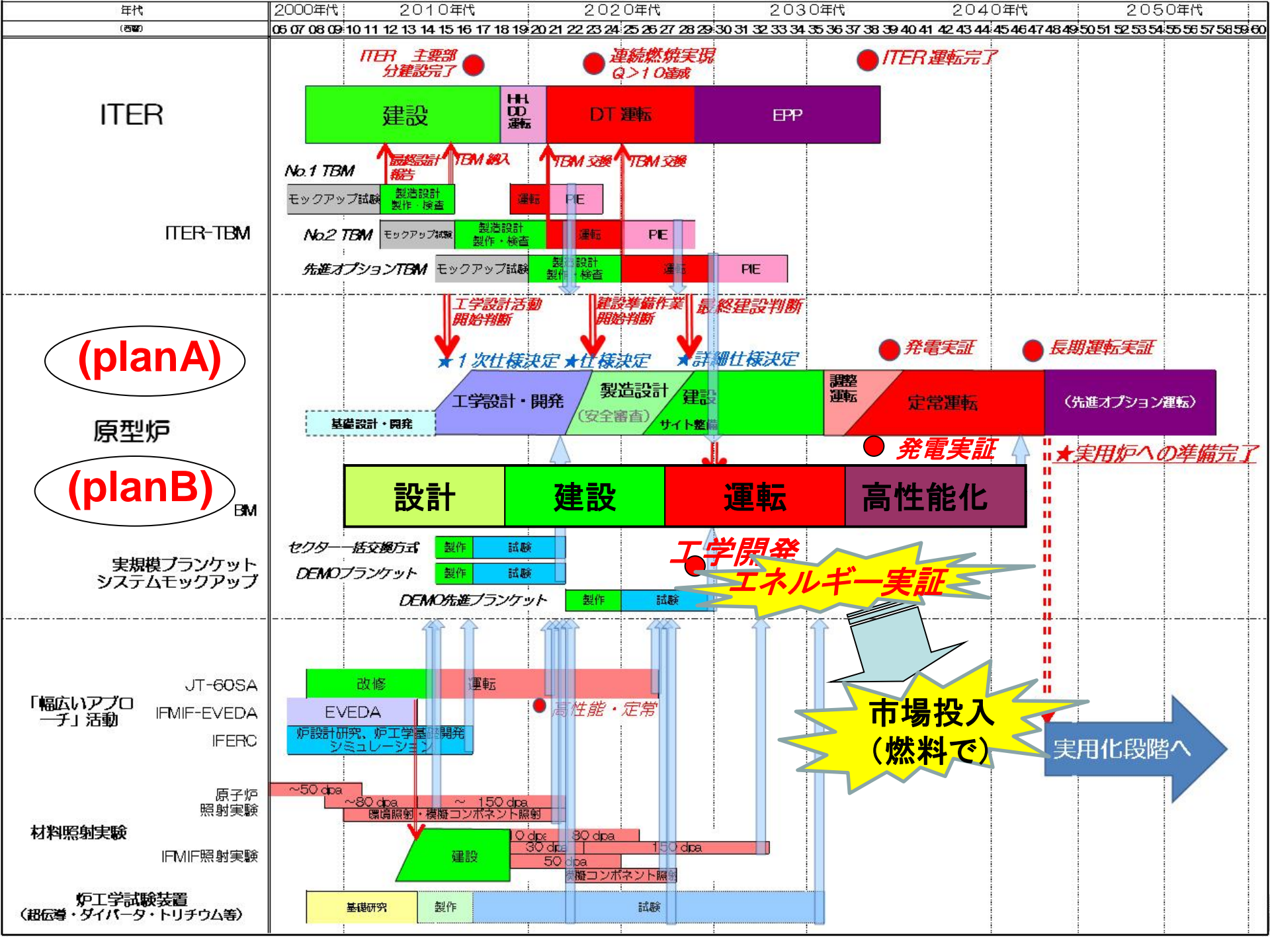
# 核融合開発の「プランB」

Institute of Sustainable Science



## 共通目標：核融合エネルギーの技術的実証

相違点	主案	代替案
時期 主目的	ITER後 プラント実証	ITER時期 工学開発・実証
プラズマ	～自己点火 定常 高性能	外部駆動 長パルス ITERレベル
ブランケット ダイバータ	高性能 >10MW	段階開発 <10MW
規模 コスト 出力	7m, 1 GWe > 1 兆円 ネット電力 純発電	約 5 m, <0.5GWt <数千億 燃料製造 バイオハイブリッド



# バイオマスハイブリッドのまとめ



*Institute of Sustainability Science*

*Institute of Advanced Energy, Kyoto University*

- ・ **バイオマス燃料化**は発電よりも環境対策上重要。  
(CO<sub>2</sub> 削減効果が大い。)
- ・ 化石燃料を代替し、途上国を含め大きな市場性。
- ・ 現在の技術レベルで**すでに経済性がある**。
- ・ バイオマス燃料化は**ハイブリッド効果**により現在レベルの小型炉で早期にエネルギー発生を可能とする。
- ・ 電力システム上も**未来社会に適合性**が高い。
- ・ **早期実用化、燃料製造で、核融合は現在の環境エネルギー**

# 結論

*Kyoto University Institute of Advanced Energy*

- ・ 核融合開発戦略は、もっと幅広いスコープで見直すべき
- ・ **二酸化炭素削減**、地球環境問題への有力な回答を。
- ・ 途上国、世界市場への展開が見込める戦略
  
- ・ プラズマ性能要求を著しく緩和、工学開発の必要性
- ・ プラント規模は小型のほうが望ましい
- ・ 発電とは異なる開発パス、ITER並行開発  
(ITERの成功を必ずしも前提としない開発ロジック)
  
- ・ 燃料製造は発電と別の市場、別の意義がある

核融合が現在の社会の要求に対する回答のひとつ  
→少なくとも**代替案**を自分で考えよう！