

—報告書—

原子力の利用拡大に向けた 高温ガス炉の実用化開発の重要性

<別添図集>

「原子力熱利用検討会」
[旧 高温ガス炉将来展開検討会]

図1-1 温室効果ガス削減目標(2008年1月現在)

(2050年迄に世界で50%、先進国で60~80%削減)

国、機関、会議体	基準年	'20年迄の削減率	'50年迄の削減率
・気候変動政府間パネル (IPCC) (May'07)	現状	---	<u>世界で50%</u>
・ハイリゲンドムサミット会議 (Jun.'07、独国)	(現状?)	---	<u>世界で50%</u>
・米国	---		50%
・カナダ	---		50%
・欧州連合(EU) (Mar.'07)	'90年	先進国で30%、 EUで20%	<u>世界で50%</u> <u>先進国で60~80%</u>
・英国(議会 ~ 首相)	'90年		70~80%
・中国	'00年	40%	80%
・インド	---	25%	---
・日本(首相) (May'07)	---	---	<u>世界で50%</u>
・東京都 (May'07)	'00年	25%(義務化)	---

図1-2 主要国の「次世代炉」開発戦略一覧

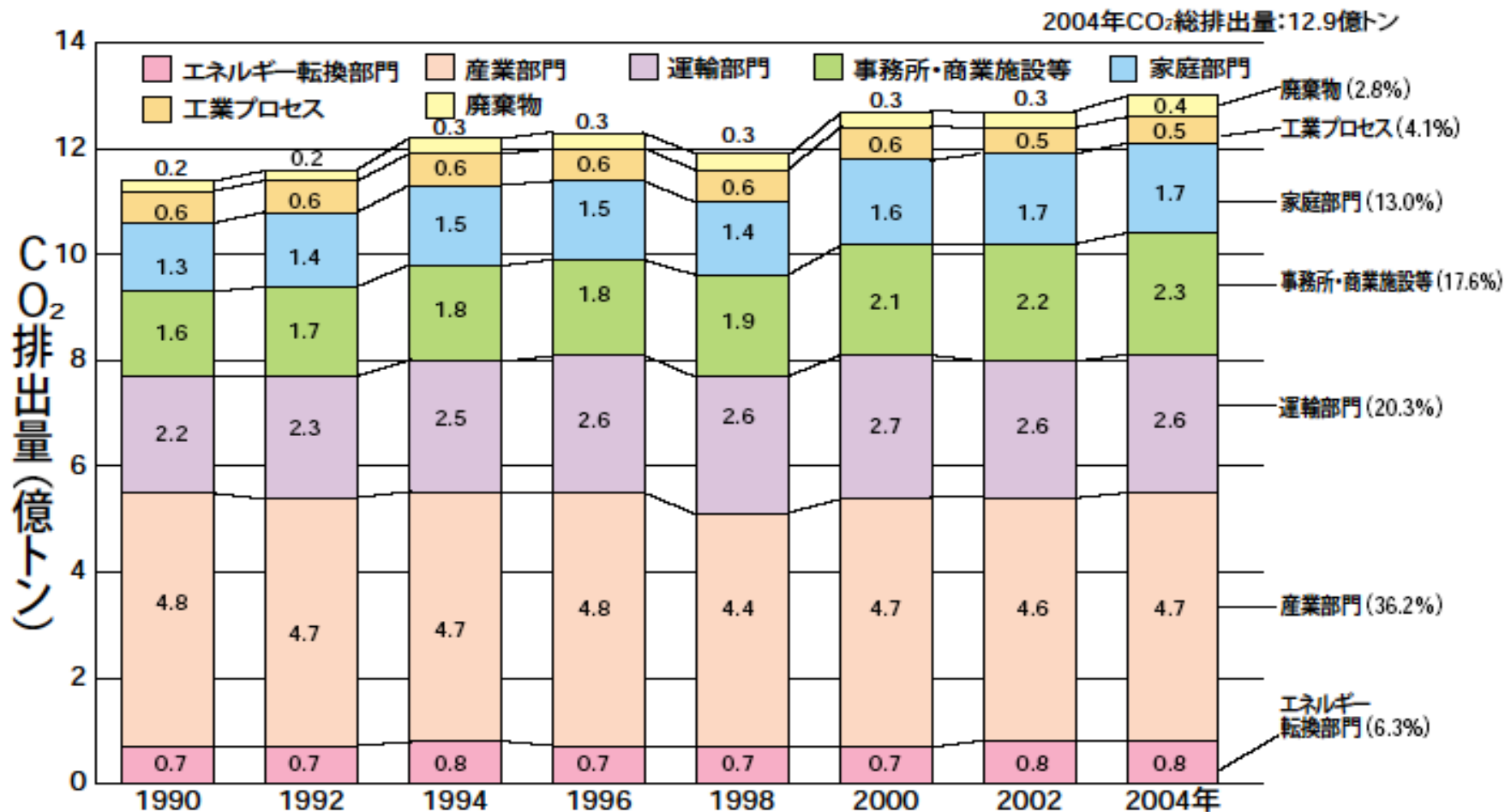
(主要国は軽水炉、高速炉に加えて、**高温ガス炉**も開発中)

国	軽水炉	高速炉	高温ガス炉	開発目標、＜戦略＞
・米国	○	○	○	・電力、 水素製造 、 熱利用 ＜エネルギー、地球環境、 <u>廃棄物低減</u> 、 <u>核不拡散</u> 、 <u>石炭活用</u> ＞
・仏国	○	○	○	・電力、 水素製造 、 熱利用 ＜エネルギー、地球環境＞
・南ア	○	---	○	・電力、 水素製造 、 熱利用 ＜エネルギー、地球環境、 <u>石炭活用</u> ＞
・中国	○	○	○	・電力、 水素製造 、 熱利用 ＜エネルギー、地球環境、 <u>石炭活用</u> ＞
・印度	○	○	(○) (高温炉)	・電力、 水素製造 、 熱利用 ＜エネルギー、地球環境、 <u>トリウム活用</u> ＞
・韓国	○	○	○	・電力、 水素製造 ＜エネルギー、地球環境＞
・日本	○	○	(?)	・電力、 水素製造 、 熱利用(?) ＜エネルギー、地球環境、 <u>技術</u> 、 <u>輸出</u> 、 <u>国際貢献</u> 、 <u>各種資源入手・確保(?)</u> ＞

図2-1-1 我が国の温室効果ガス排出量

(産業、運輸、民生分野からの排出が大)

部門別CO₂排出量の推移



(出典) 電事連、原子力・エネルギー図面集、2007年

Why High Temperature? Process Heat Applications

- ・ガラス製造
- ・セメント製造
- ・製鉄
- ・発電(ガスタービン)
- ・石炭ガス化
- ・水素製造
- ・エチレン製造等
- ・重油改質
- ・パルプ製造
- ・海水脱塩等

- <超高温ガス炉>
- <高温ガス炉>
- <高速炉>
- <軽水炉、重水炉>

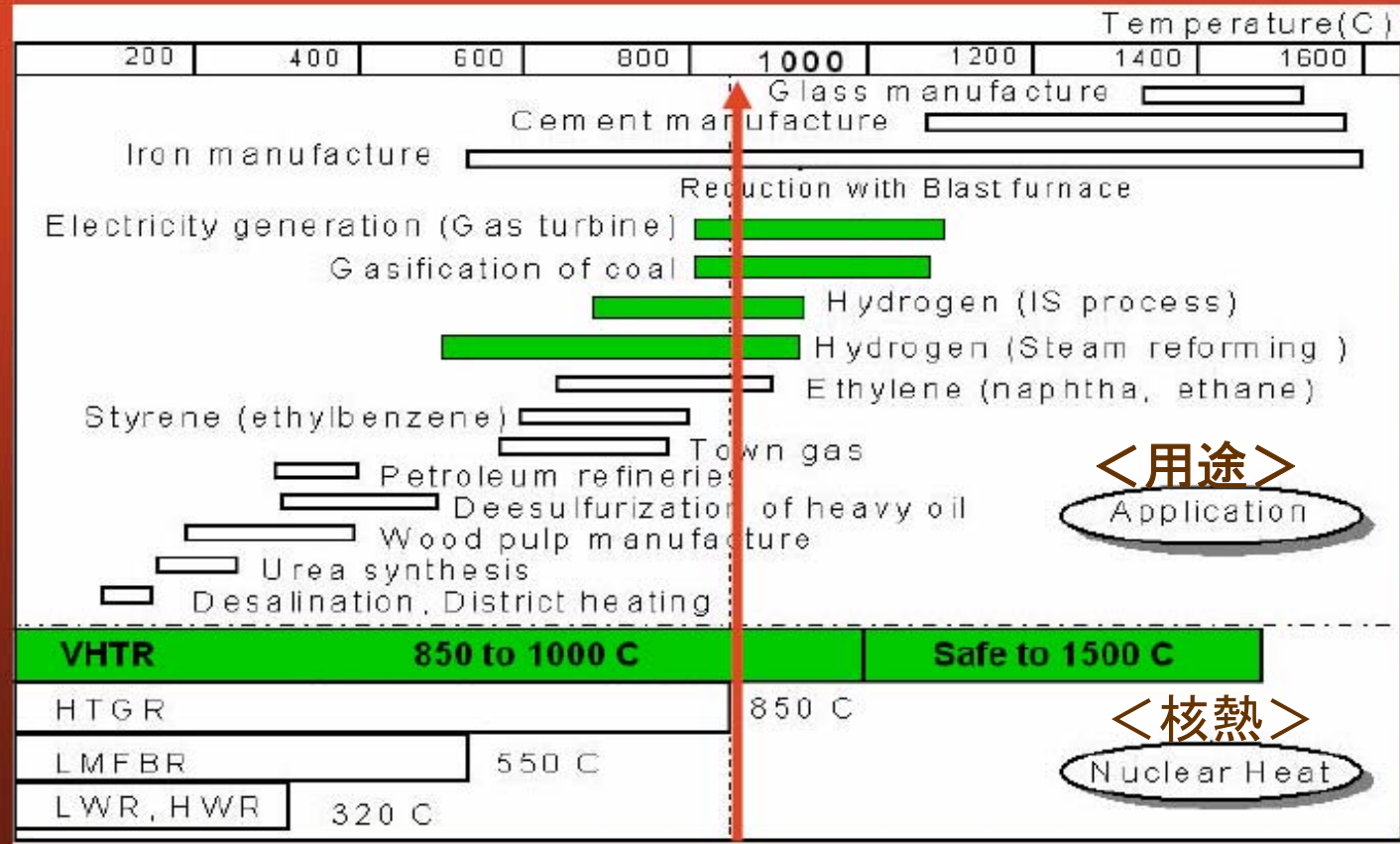
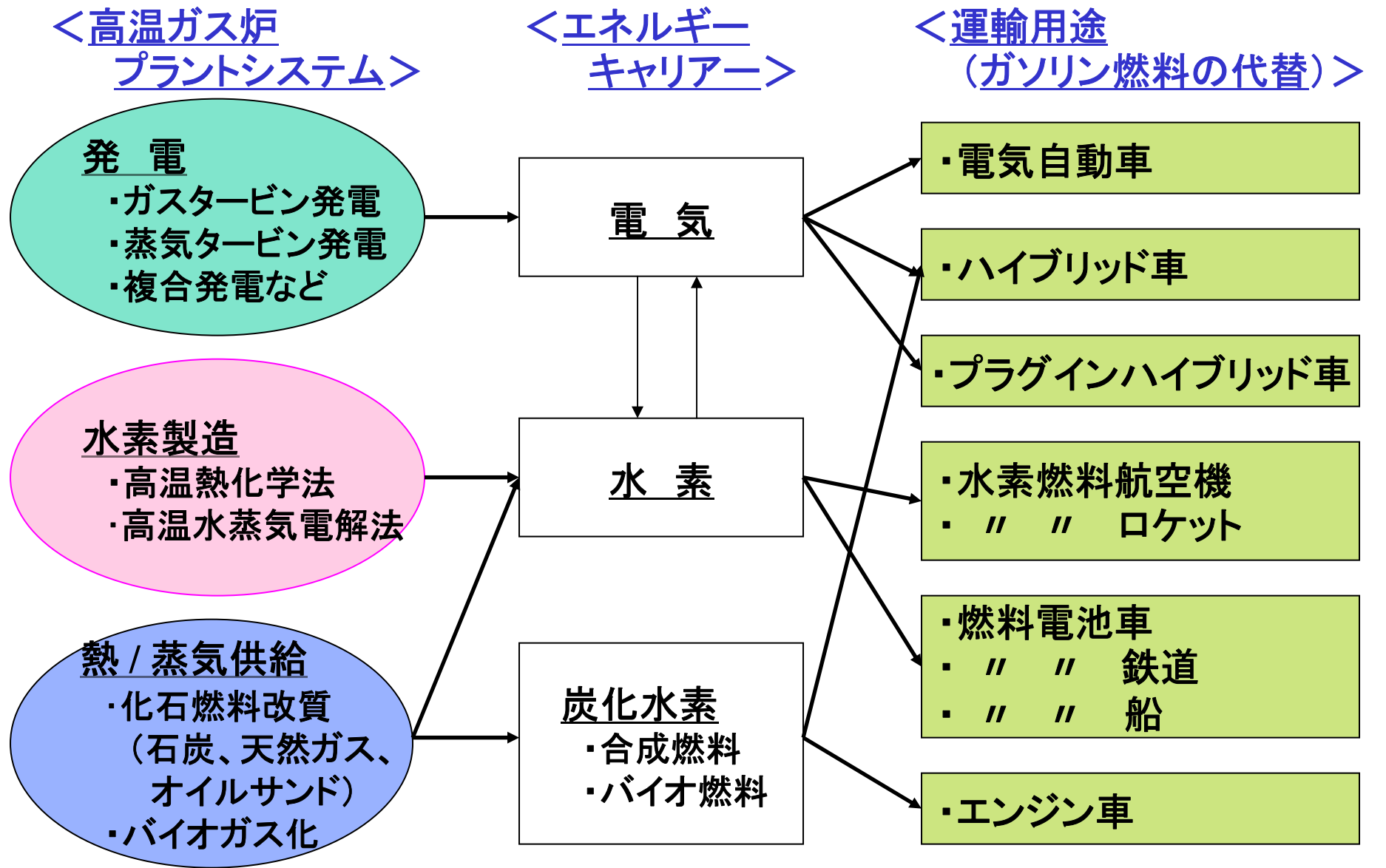


図2-1-2 各種原子炉と熱利用

(高温ガス炉/超高温ガス炉は、軽水炉や高速炉に比べて、
利用温度範囲が広く、用途も広い)

(出典) UT Systems (UTPB)/GA/Permian Basin, HTTTR (HT³R), 2006⁵

図2-1-3 高温ガス炉による運輸用エネルギー供給(可能性)



(出典) 土江保男、高温ガス炉プラント研究会講演、2007年11月16日、仙台

PBMR Direct Brayton Cycle

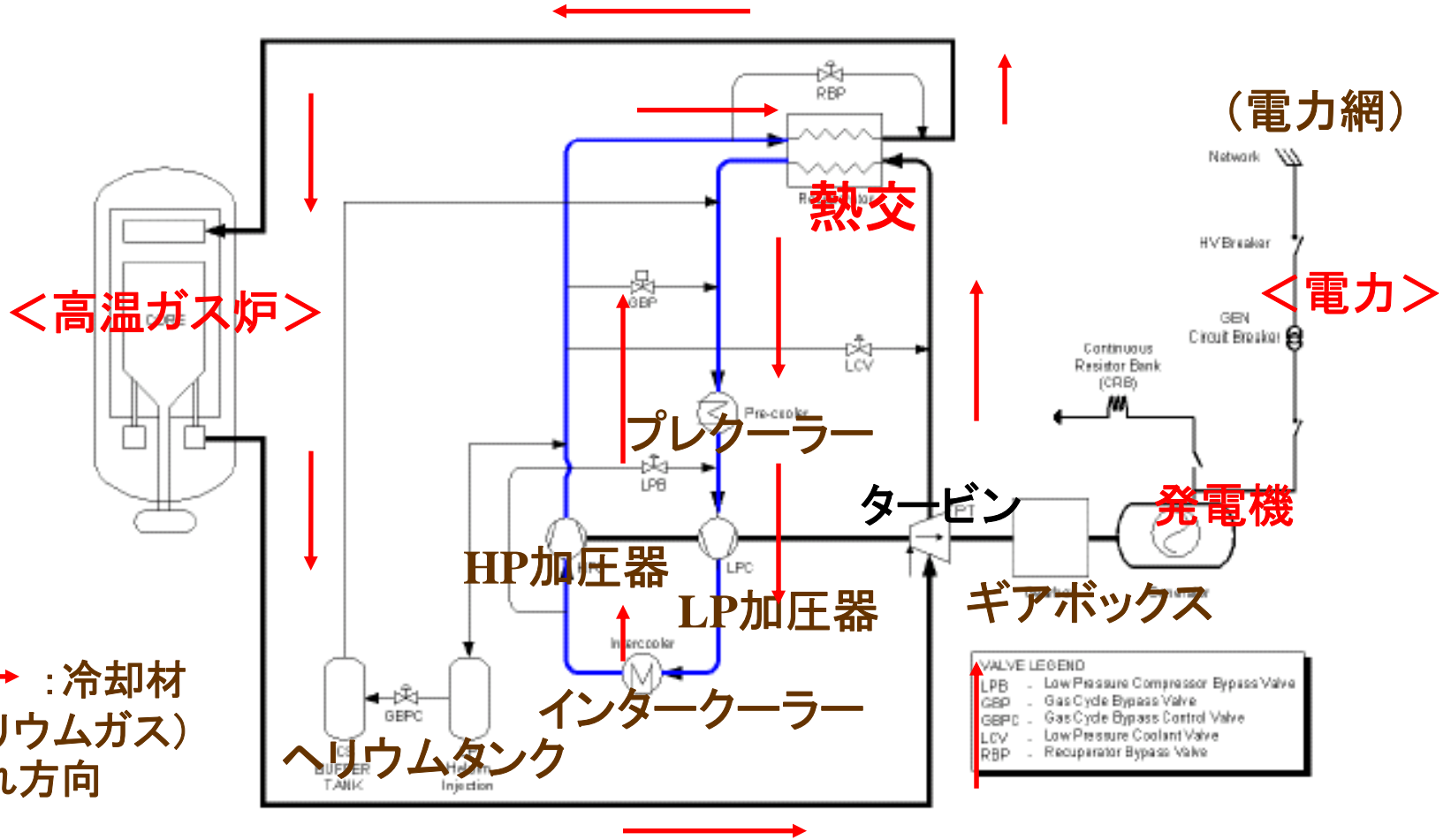
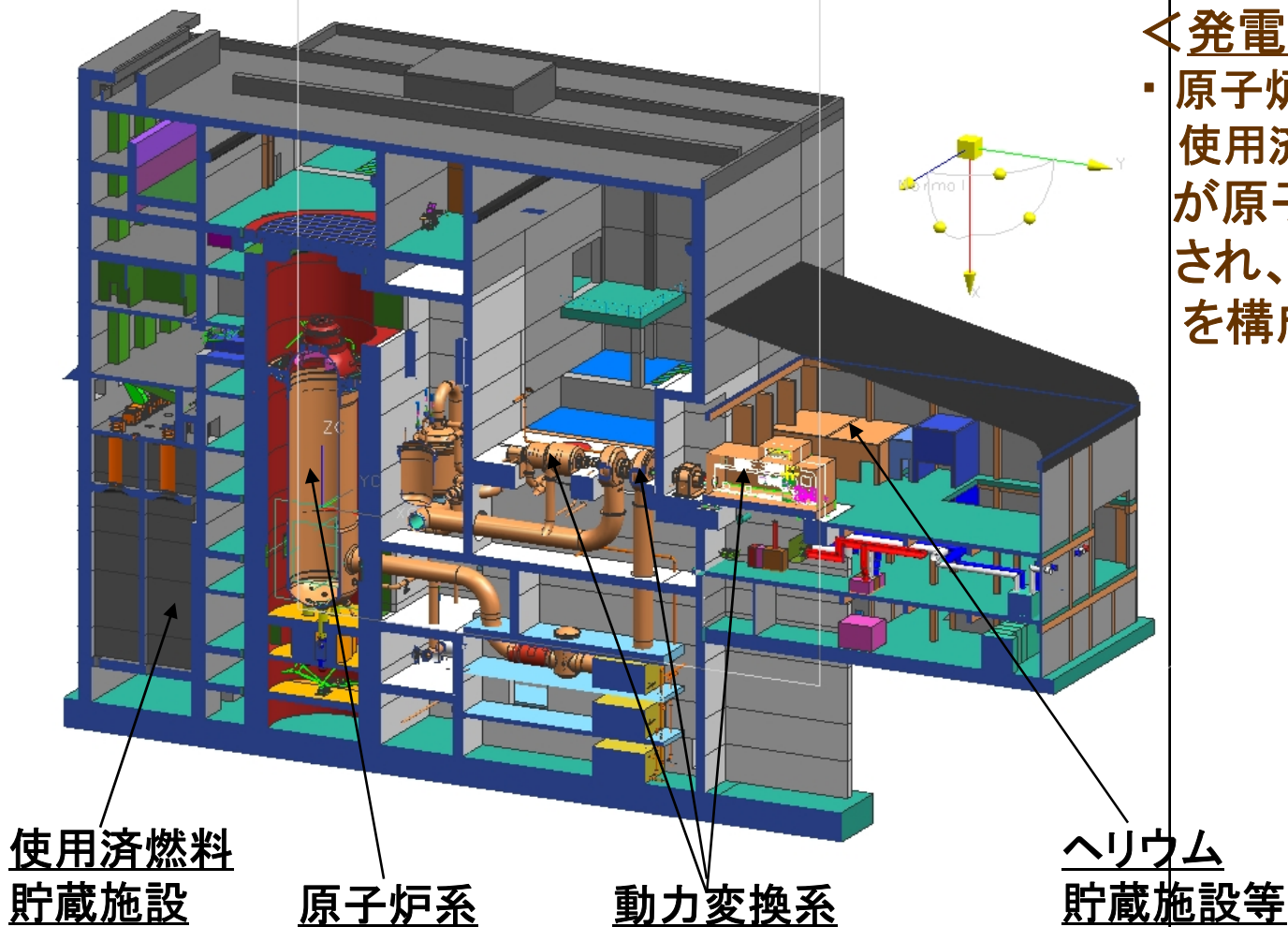


図2-1-4 高温ガス炉による発電(直接サイクル)

(出典) D. Matzner, PBMR Design Certification Pre-Application Meeting, NRC, Rockville, Md, Nov.3, 2004



＜発電モジュール＞

- ・原子炉系、動力変換系、使用済燃料貯蔵施設等が原子炉建屋内に収納され、1つのモジュールを構成

TOP WORK

図2-1-5 モジュール建屋断面(発電)(概念)(南アPBMR)

(出典) D.Nicholls; IAEA TWG-GCR, Jan. 17-19, '05, Manchester, UK、他

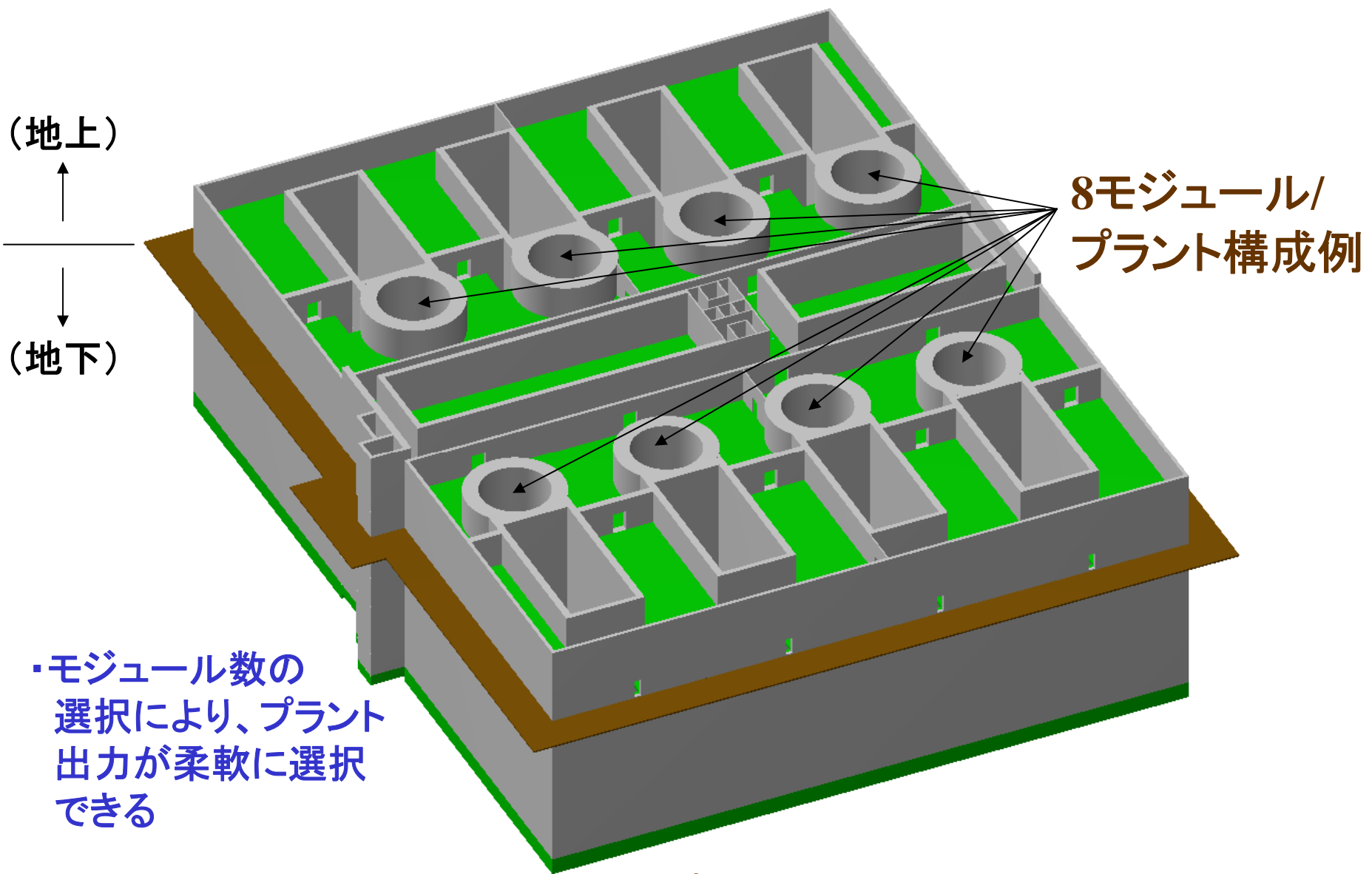


図2-1-6 マルチモジュール・プラント構成(概念) (南アPBMR)
 (出典) D.Nicholls, IAEA Conf. on Innov. Reactors & Fuel Cycles, Jun. 23-26, 2003, Vienna₉

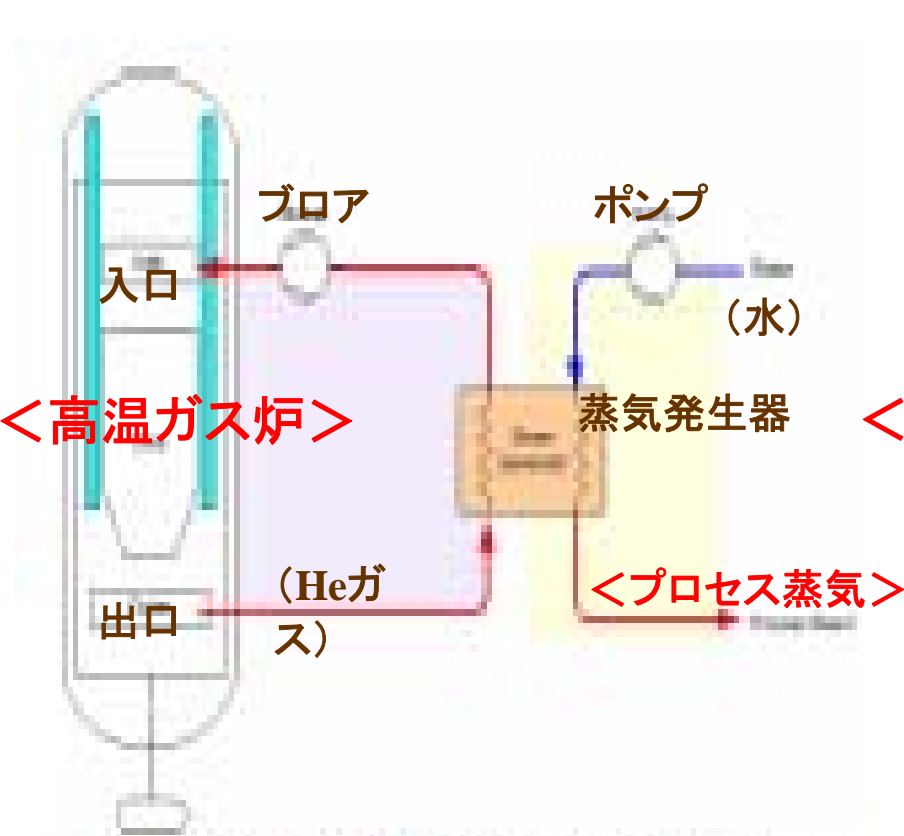


図1 蒸気 供給

<オイルサンド(ビチューメン
回収/改質)産業向け>

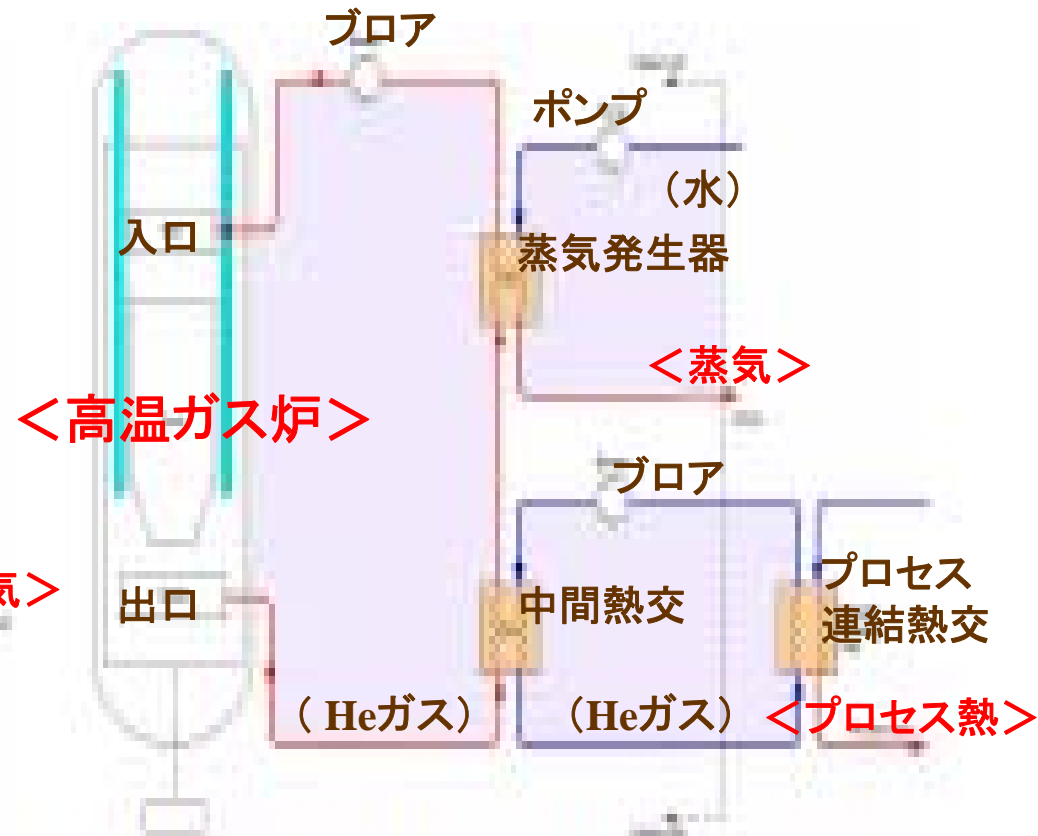


図2 蒸気 / 熱 供給

<天然ガス改質; 合成ガス(水素、
アンモニア、メタノール)製造向け>

図2-1-7-1 各種熱利用向け高温ガス炉プラント設計 (例: 南アPHP)

(出典) W.Kriel (PBMR-US); HTR-2006, Oct.2-4, 2006, Johannesburg, S.Africa

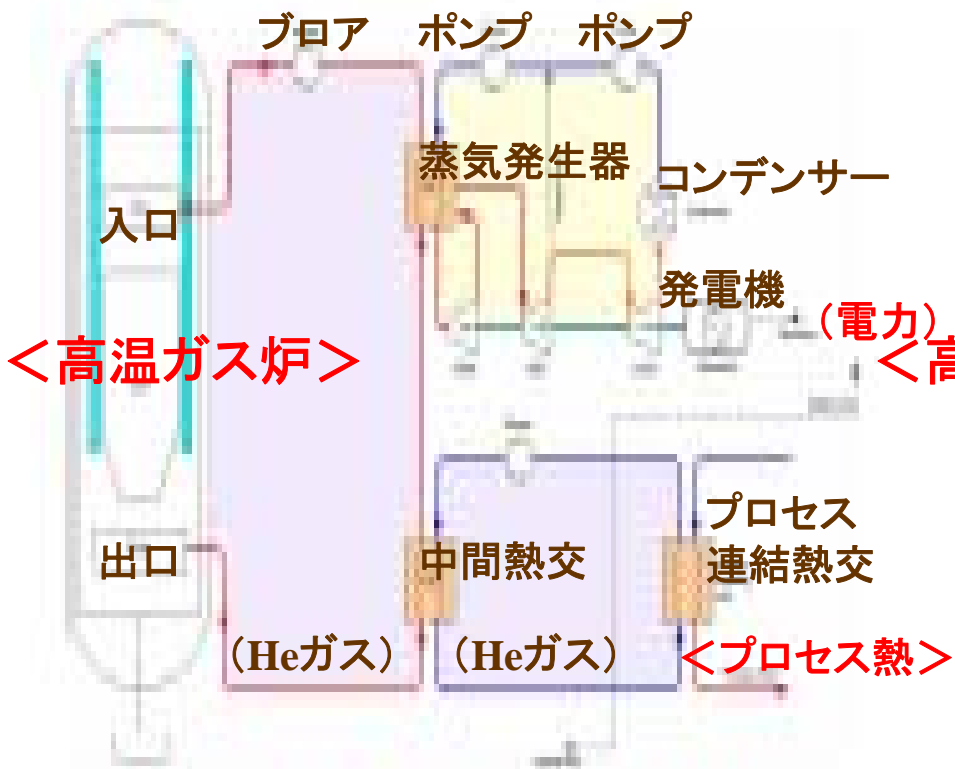


図3 電力 / 熱 供給

＜水素/酸素製造; 石炭ガス化/液化向け＞

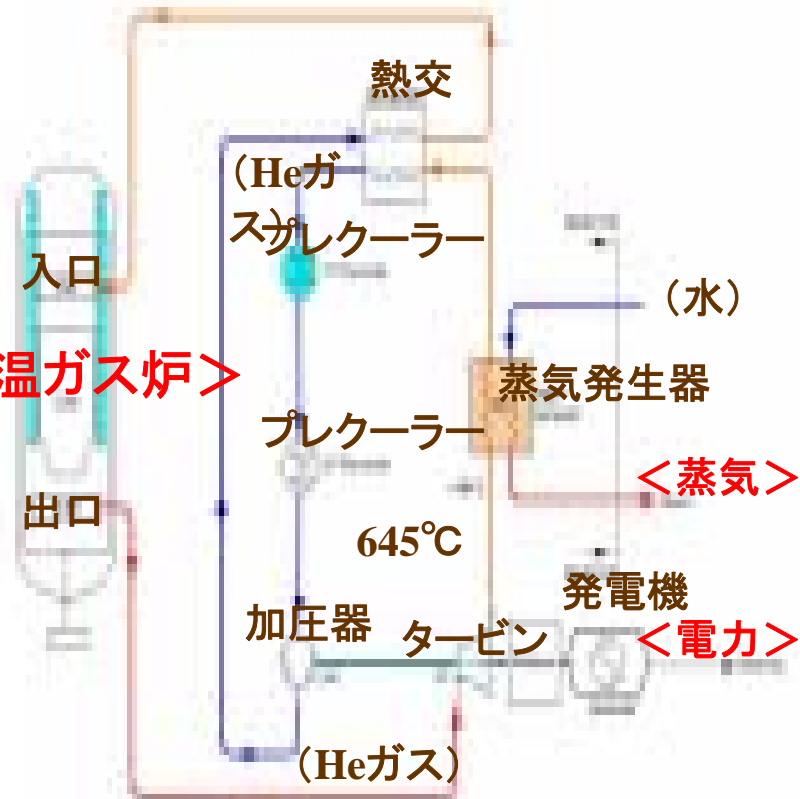


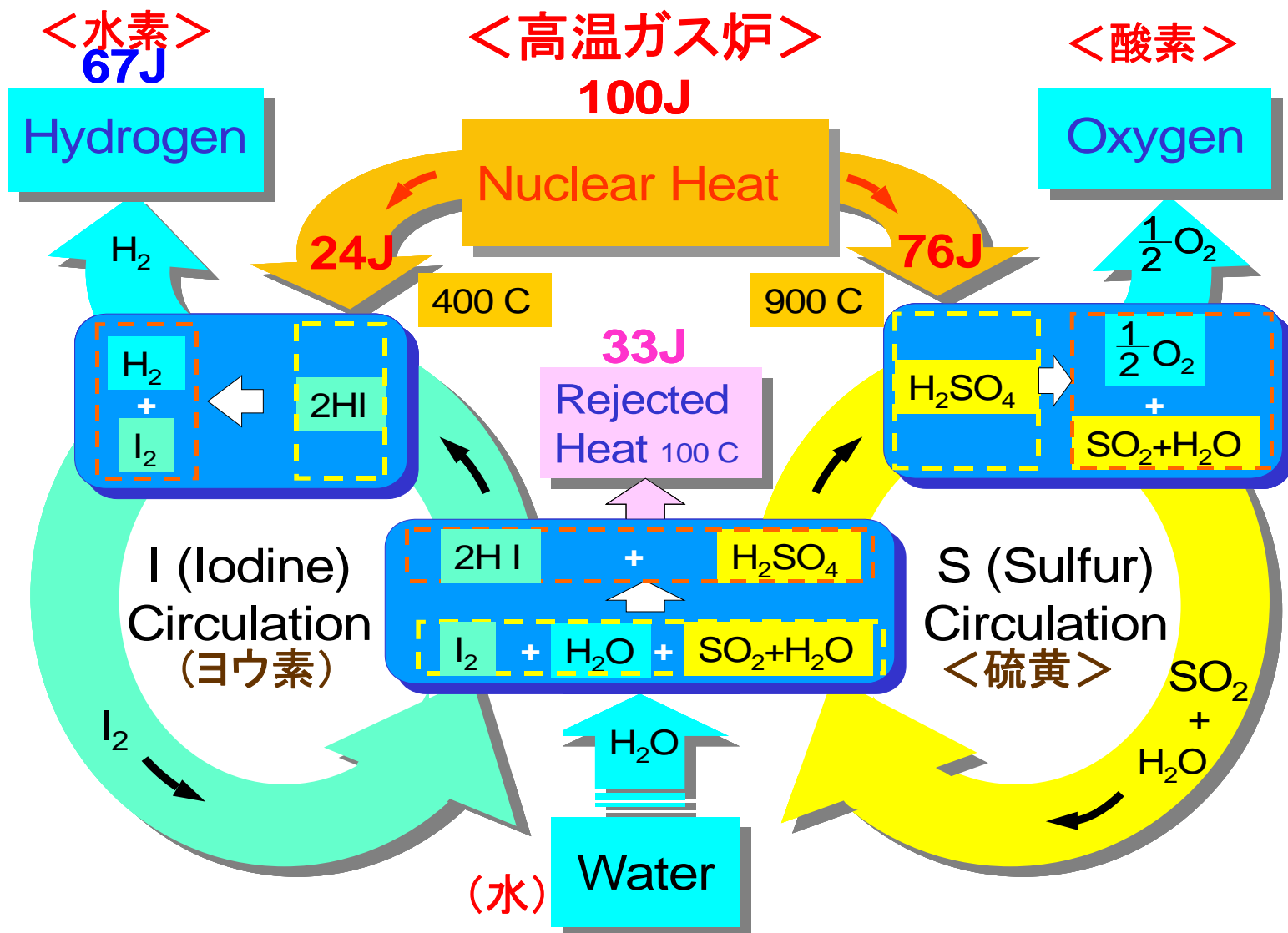
図4 電力 / 蒸気 供給

＜石油化学、オイルサンド産業向け＞

図2-1-7-2各種熱利用向け高温ガス炉プラント設計 (例: 南アPHP)

(出典) W.Kriel (PBMR-US); HTR-2006, Oct.2-4, 2006, Johannesburg, S.Africa

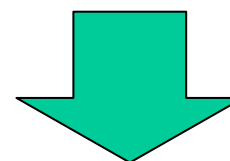
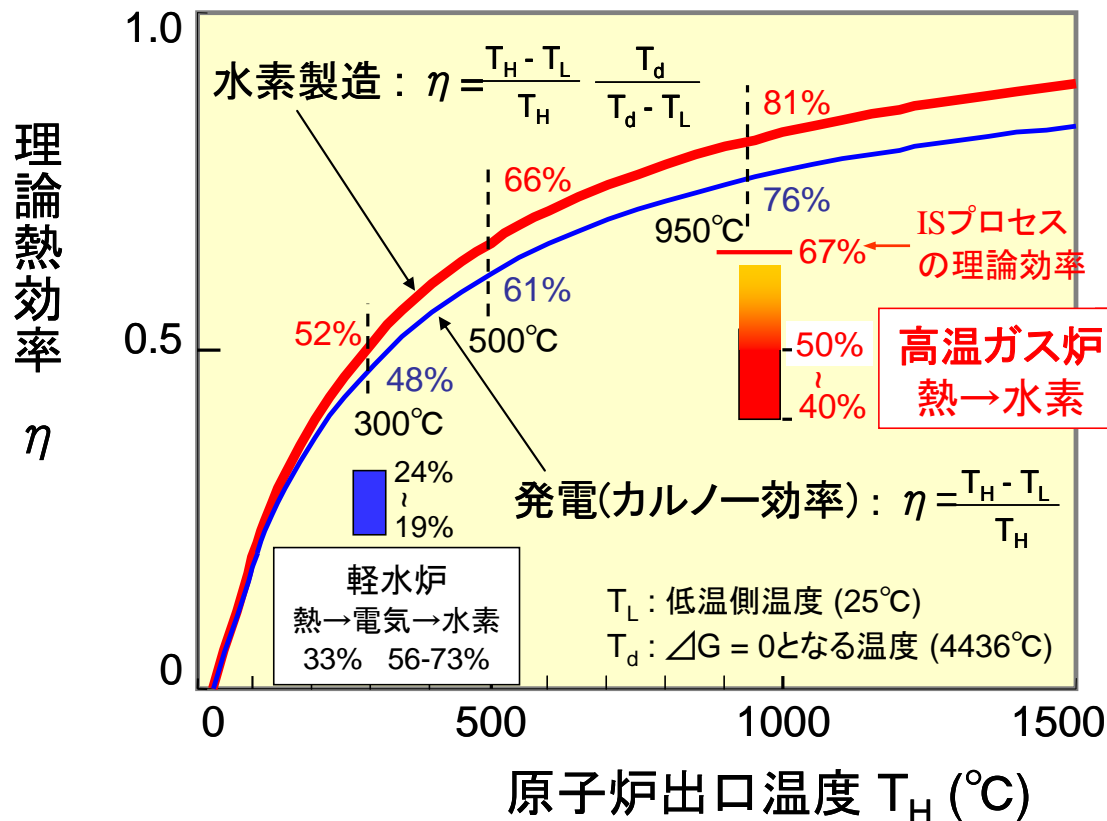
図2-1-8 原子力による水素製造(ヨウ素・硫黄(IS)法の例)



(出典) T. Iyoku (JAERI) ; HTTR WS on Nucl. Prod. of H_2 , Jul.5-6, 2004, Oarai, Japan

図2-1-9 なぜ、水素製造に高温ガス炉を用いるのか？

■ 水から水素を作るとき、高温ほど高効率！



■ 高温の熱を供給できるのは、原子力では、高温ガス炉！

(出典)小川益郎、高温ガス炉プラント研究会講演、2007年11月16日、仙台



乗用車: Honda FCX(水素燃料電池)

トレーラー: Honda FCX(水素燃料電池)



ジェット機: A310 Airbus(水素燃料)

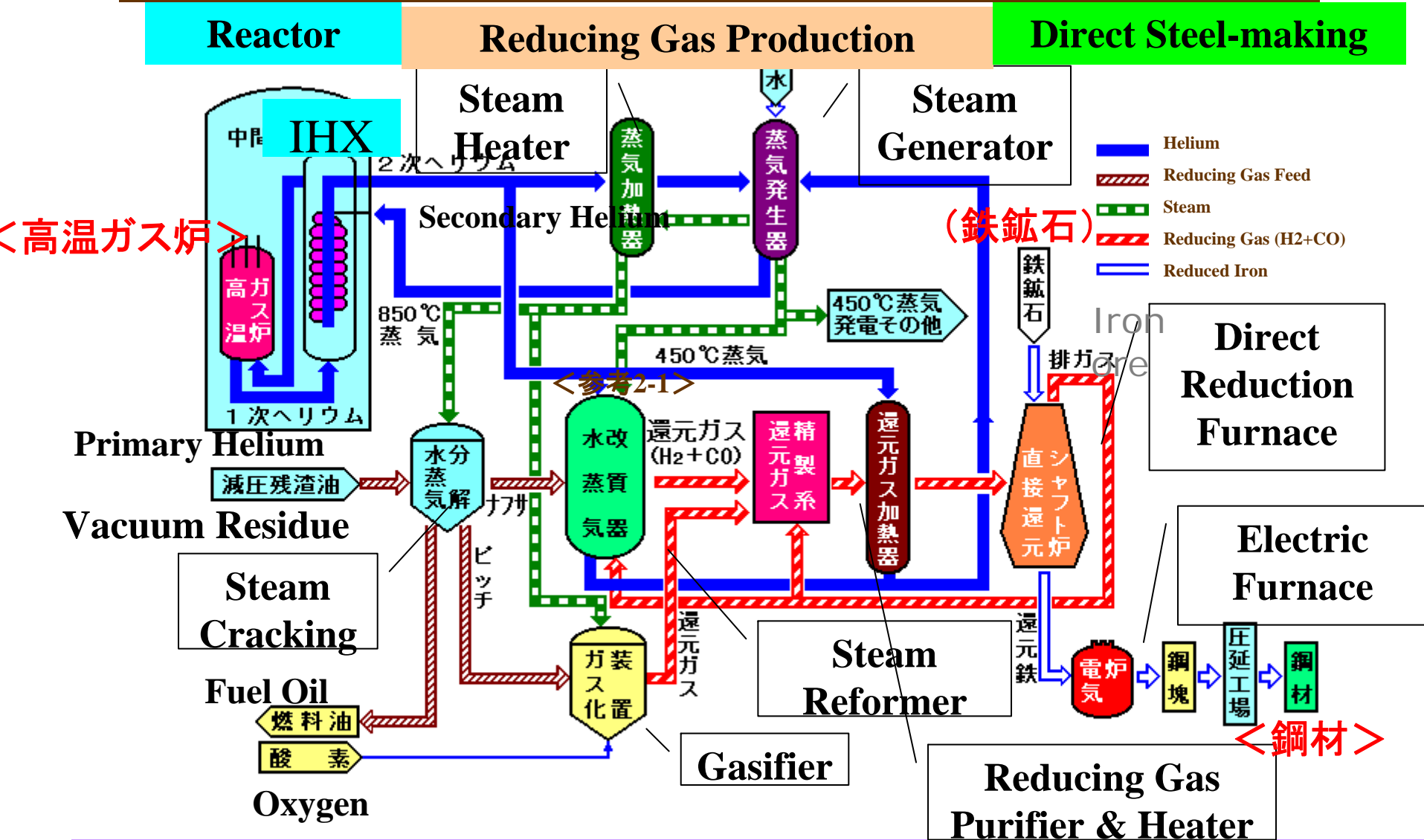
ロケット: 2nd Stage Saturn 5(水素燃料)

図2-1-10 水素の利用(水素燃料自動車、航空機等の例)

(出典) file:///C:/Documents%20and%20Settings;

A magazine article about the Ford P2000, etc.

図2-1-11 '70年代の日本における原子力製鉄概念



Japanese Nuclear Steel Concept in 70's

(出典) K. Matsui (IAE), K. Kunitomi (JAEA), IAEA Conf. on Non-Electrical Applications of Nuclear Power, Apr.16-19, 2007, Oarai, Japan

Nuclear Hydrogenating Coal Gasification

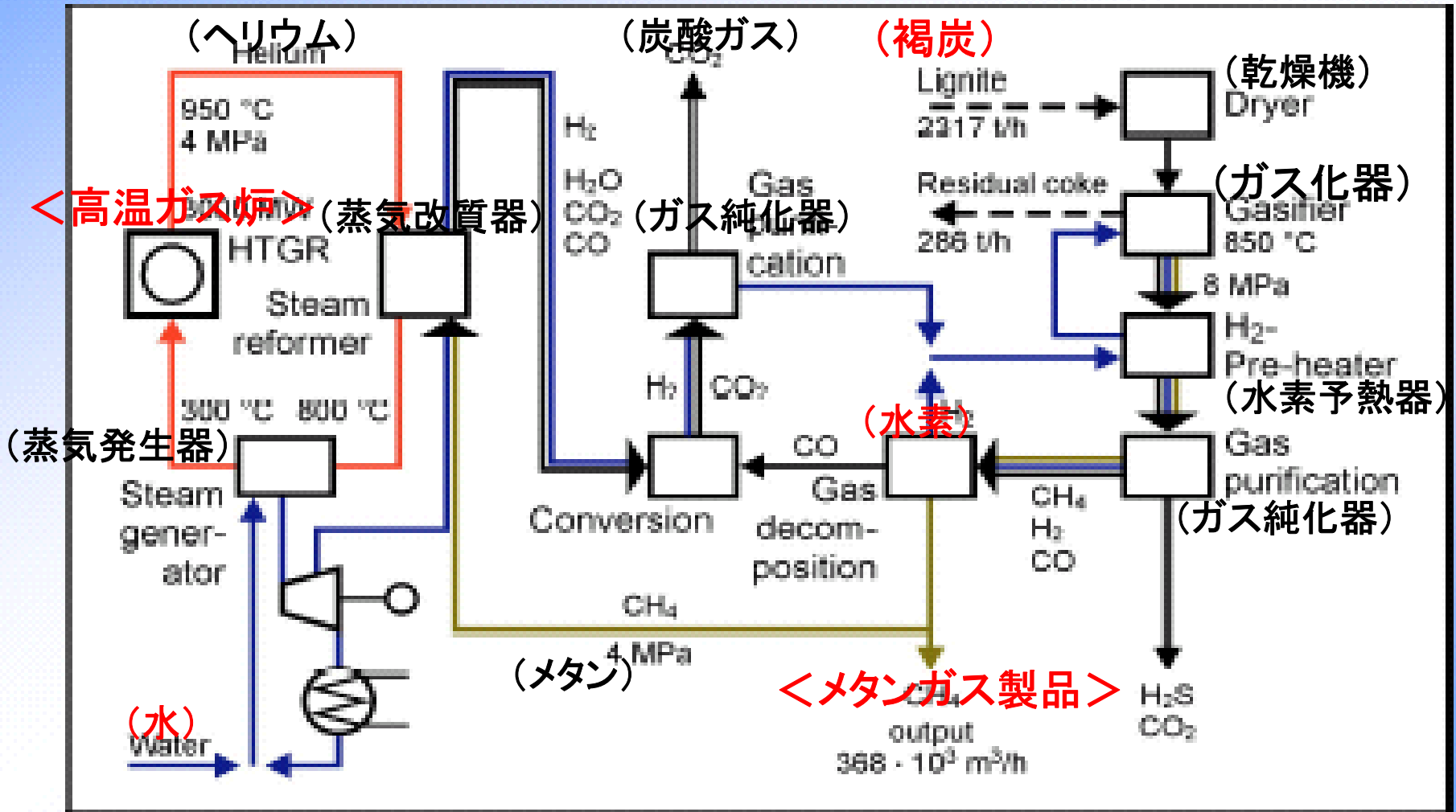
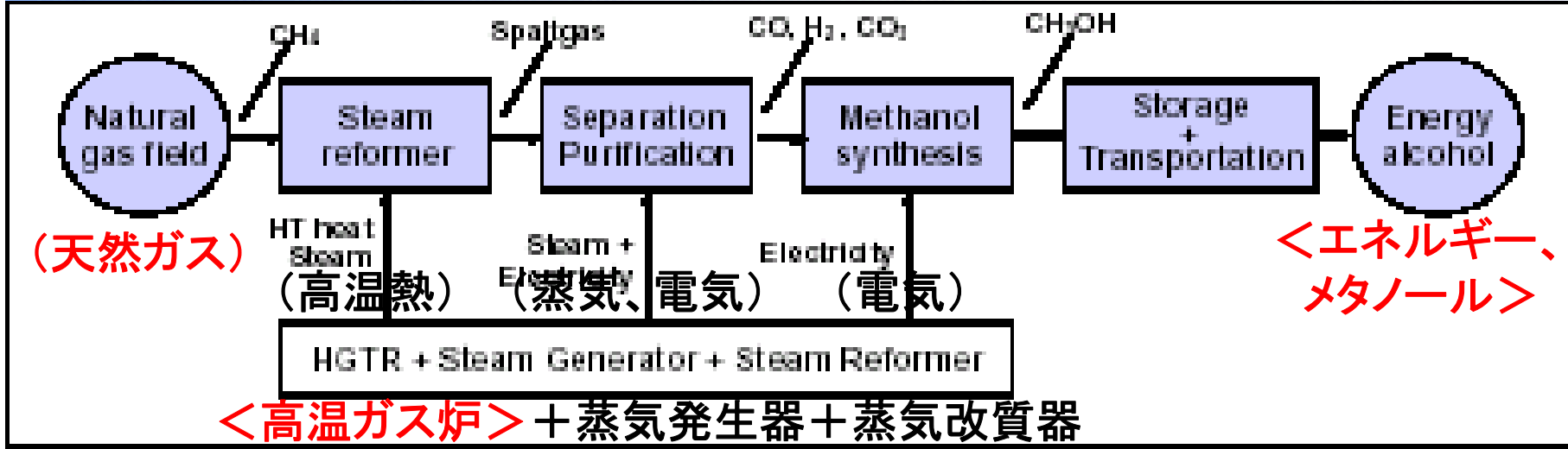


図2-1-12 高温ガス炉による石炭ガス化

(出典) K.Verfondern (FCZJ); IAEA Conf. on Non-Elec. Applications of Nuc. Power, Apr.16-19, 2007, Oarai, Japan

Methanol from Natural Gas

(蒸気改質器) (分離、純化) (メタノール合成) (貯蔵、輸送)

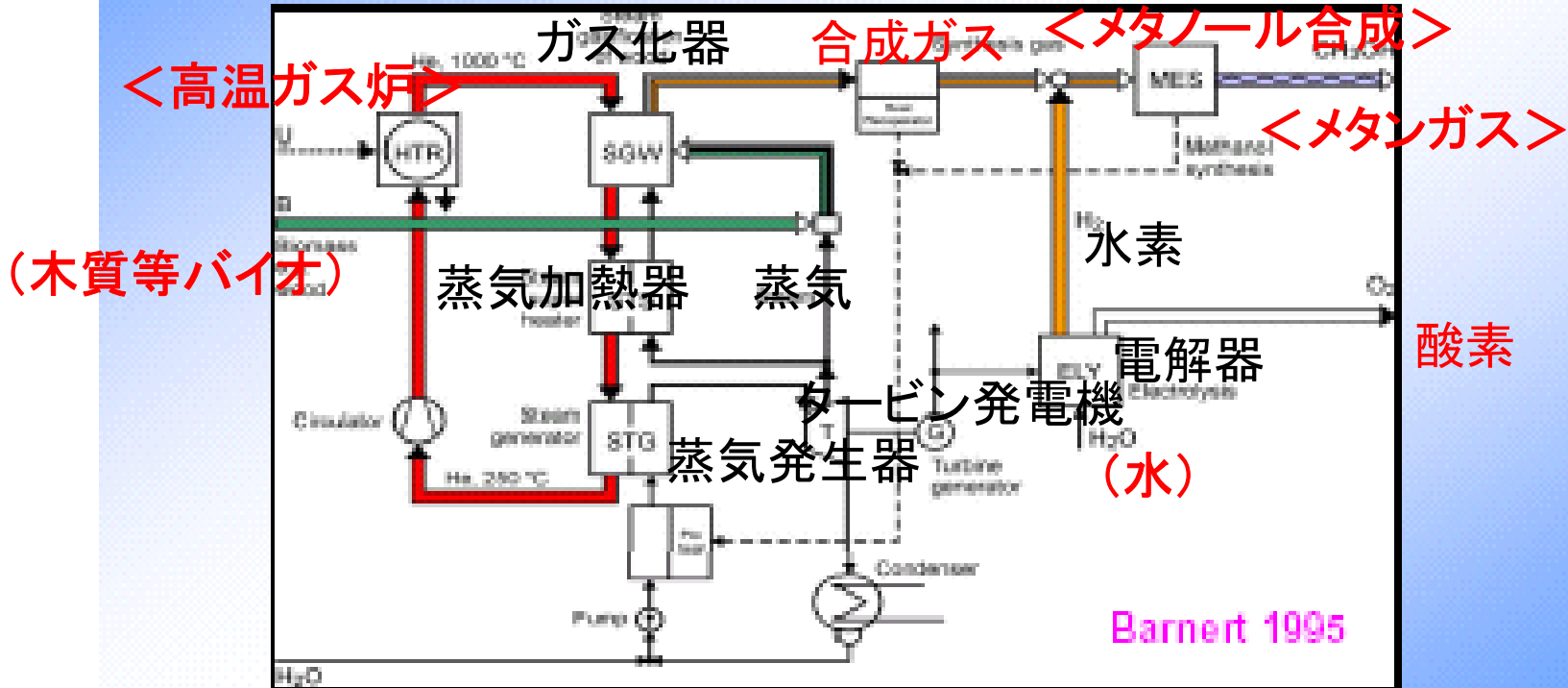


- Conv.: 1000 m³ Erdgas ⇒ 1 t Methanol + 1.5 t CO₂
- Nuclear: 1000 m³ Erdgas + 10 MWh_m ⇒ 2 t Methanol

図2-1-13 高温ガス炉による天然ガス改質(メタノール製造)

(出典) K.Verfondern (FCZJ); IAEA Conf. on Non-Elec. Applications of Nuc. Power, Apr.16-19, 2007, Oarai, Japan

Liquid Fuels from Biomass and Nuclear



- Conv.: 12 t Biomasse ⇒ 1 t liquid HC (e.g., CH₃OH)
- Nuclear: 12 t Biomasse + 10 MWh_{in} ⇒ 2 t liquid HC (e.g., CH₃OH)

図2-1-14 高温ガス炉によるバイオから合成燃料製造

(出典) K.Verfondern (FCZJ); IAEA Conf. on Non-Elec.Applications of Nuc. Power, Apr.16-19, 2007, Oarai, Japan

Nuclear Production of Synthetic Crude Oil

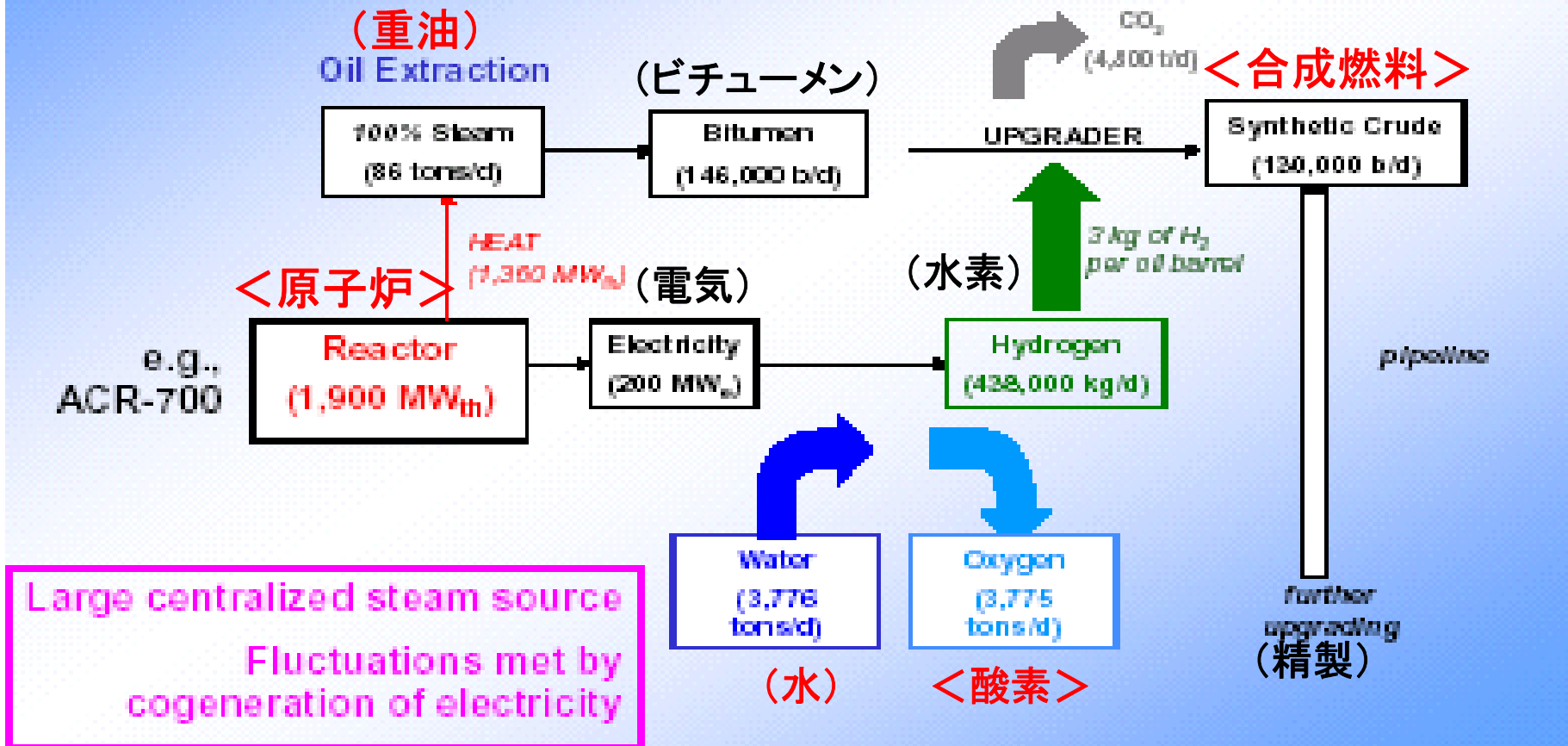


図2-1-15 原子力による重油改質(合成燃料製造)

(出典) K.Verfondern (FCZJ); IAEA Conf. on Non-Elec. Applications of Nuc. Power, Apr.16-19, 2007, Oarai, Japan

Examples of Commercial Use of Nuclear Process Heat

- Canada, Bruce NPP with 5350 MW to D₂O production plant and other industries (重水製造、カナダ)



- Germany, Stade NPP with 30 MW to salt refinery (海水脱塩、独国)

D₂O production, Bruce

- Switzerland, Goesgen NPP with 25 MW to cardboard factory (ボール紙製造、スイス)

図2-1-16 原子カププロセス熱の商業利用 (重水製造、海水淡水化など)

(出典) K.Verfondern (FCZJ); IAEA Conf. on Non-Elec.Applications of Nuc.Power, Apr.16-19, 2007, Oarai, Japan

図2-1-17 負荷変動に対応した高温ガス炉システム(1/2)

(出典)小川益郎、高温ガス炉プラント研究会講演、2007年11月16日、仙台

1. 運転パターン

- ・夜間(23時～7時):水素製造
- ・昼間(7時～23時):ガスタービン発電+水素燃焼発電

2. 性能/コスト評価

- ・昼間(7時～23時)の電力供給量：352MWe
 - 内訳:ガスタービン発電 280 MWe、水素燃焼発電 72MWe
 - ・発電コスト：約5.7 円/kWh
- ⇒ LNG火力の発電コストを大幅に下回り、競合可能 (右表)

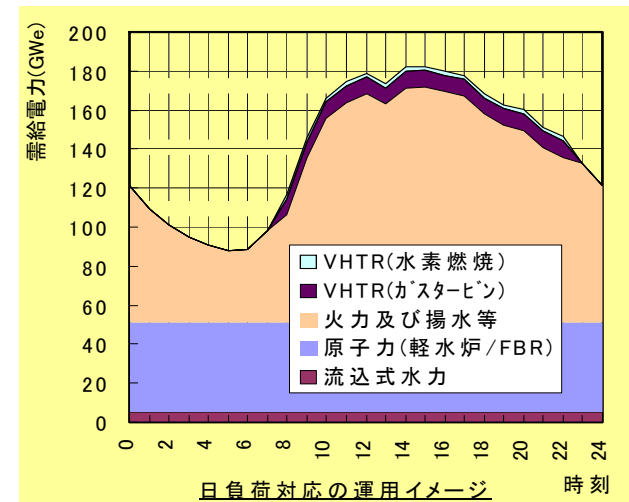
3. 本プラント導入による効果

- ・本プラント30基の導入により、火力発電プラント全設備容量の7%程度をリプレース可能 (運用イメージ:右図)

発電コストの比較

	発電コスト ^{*1} (円/kWh)
本プラント(年間稼働率 80%)	約5.7
LNG火力 ^{*2} (稼働率 80%) (稼働率 30%)	約6.2 約8.6
GTHTR300 (0～100% 負荷追従 ^{*3})	約6.2

*1 割引率 3%
*2 出典:参考文献1。
*3 ガスタービン発電のみで、夜間は出力を0%に低下すると仮定。



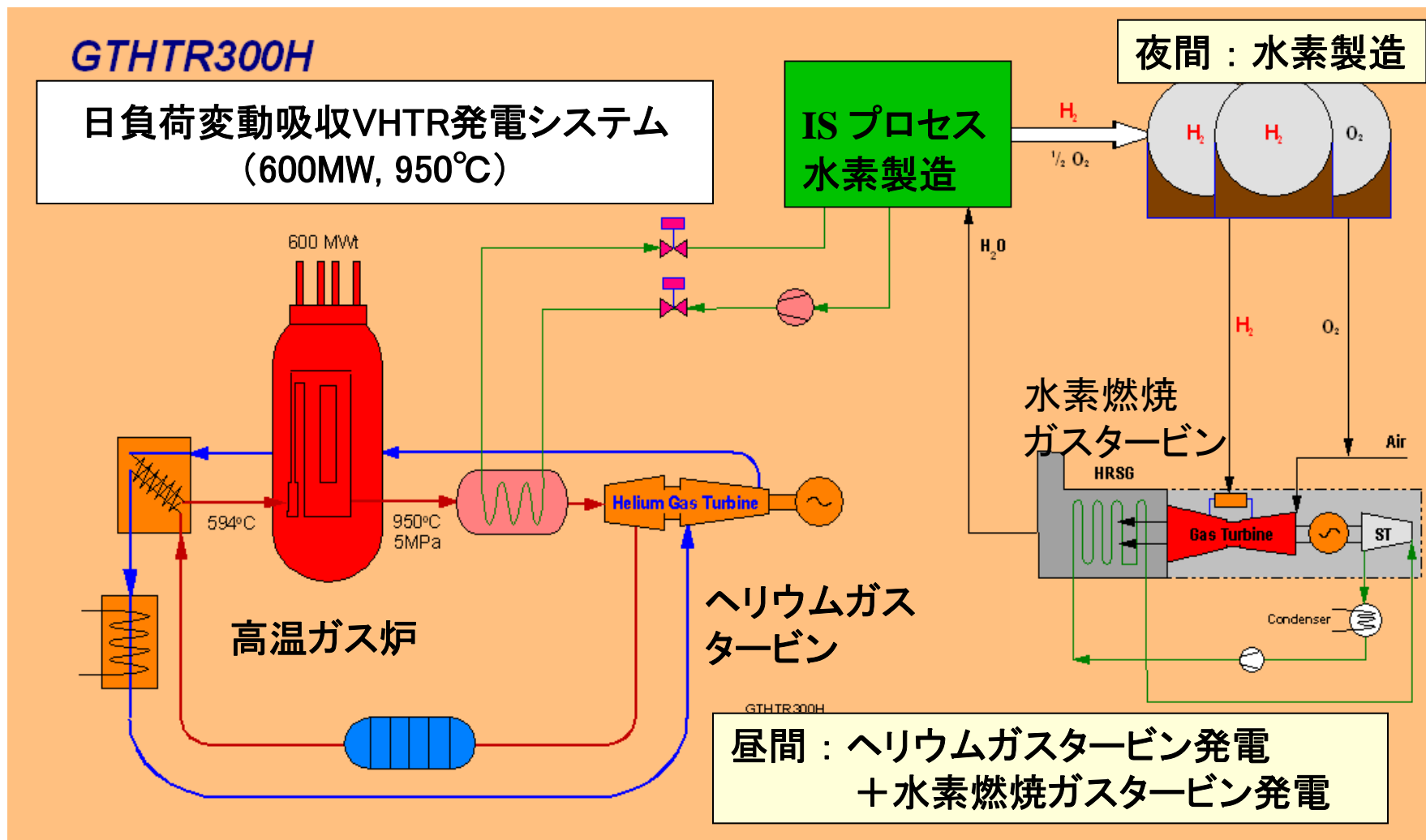
(本図は、参考文献2に記載の2001年7月24日の需要実績データや、当時の電源設備容量データに基づき作成。)

参考文献

1. 電事連, “モデル試算による各電源の発電コスト比較”, 平成16年1月.
2. 資源エネルギー庁, エネルギー白書2005.

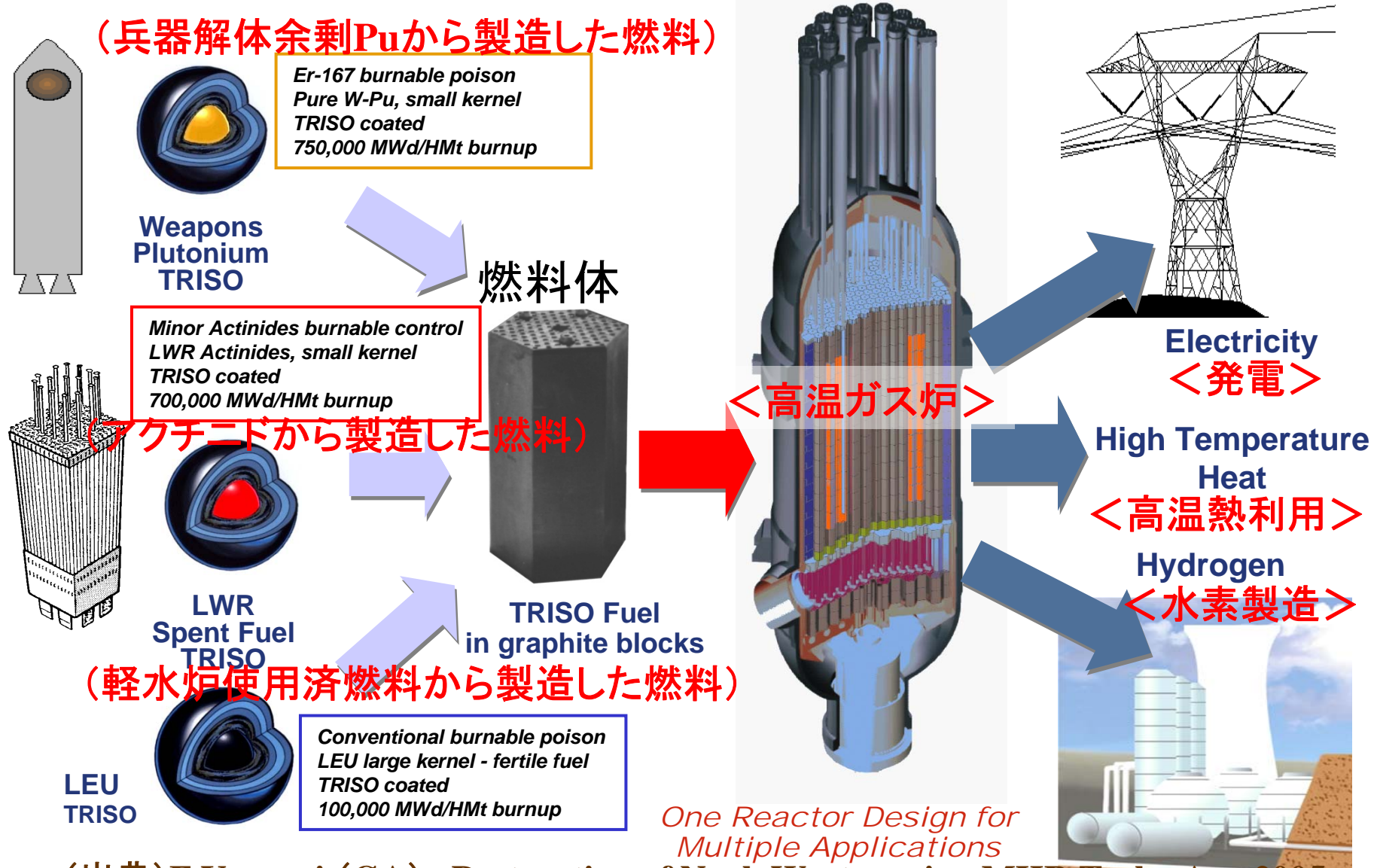
図2-1-18 負荷変動に対応した高温ガス炉システム(2/2)

(昼間は発電、夜間は水素製造・貯蔵) (原子炉は昼夜一定運転)



(出典)小川益郎、高温ガス炉プラント研究会講演、2007年11月16日、仙台

図2-1-19 高温ガス炉による発電、水素製造、高温熱利用、Pu燃焼



(出典) F.Venneri (GA); Destruction of Nucl. Wastes using MHR Tech., Apr.2005

図2-2-1 主要国の高温ガス炉開発スケジュール

(---設計、許認可; —建設; —運転)

	2005	2010	2015	2020	2025	2030年
<米国> ・NGNP					実証炉	
<仏国> ・ANTARES				実証炉?		
<南ア> ・PBMR			実証炉(実用1号炉兼用)			
・PBMR			(発電用)実用炉(24基)			
・PHP			(各種熱利用)実用炉			
<中国> ・HTR-10	試験研究炉					
・HTR-PM			実証炉(実用1号炉兼用)			
・HTR-PM			(発電用)実用炉(18基)			
<韓国> ・NHDD					(水素製造用)実証炉	
<日本> ・HTTR	工学試験研究炉					
・GTHTR300			炉/水素製造連結実証?		実証炉?	実用炉?

図2-2-2 高温ガス炉の次世代炉要件適合性(1/2)

(高温ガス炉は次世代的要求を満たす)

(出典) 第IV世代炉国際フォーラム(GIF)要件など

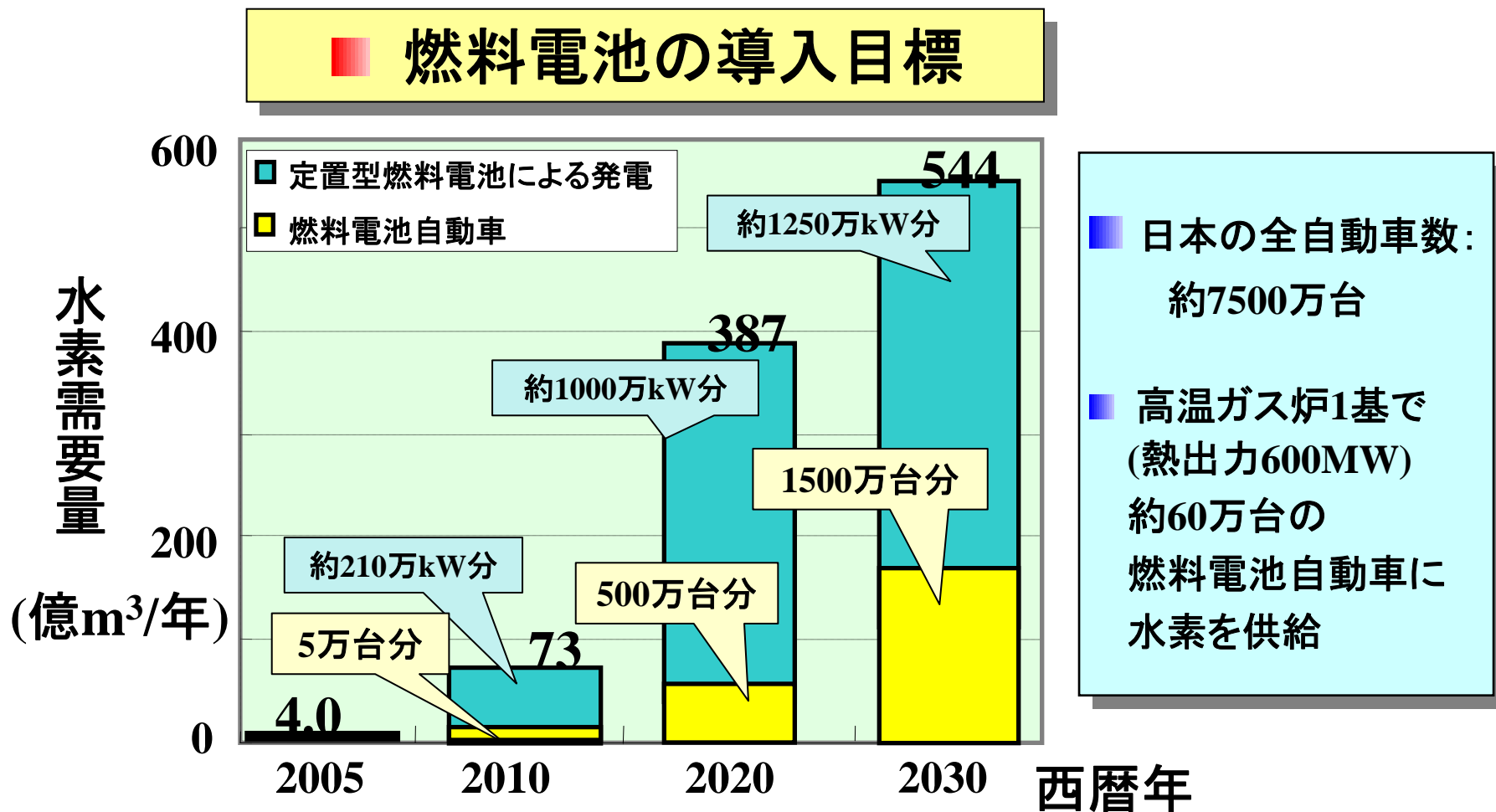
次世代炉要件	高温ガス炉の適合性
1) 安全性	<ul style="list-style-type: none">・炉心は下記で構成され、熱的、機械的、化学的に安定<ul style="list-style-type: none">－燃料、炉内構造材料(黒鉛)、減速材(黒鉛)、冷却材(ヘリウム(He)ガス)・炉心構成の大半は黒鉛材料で、熱的慣性が大きく、反応度温度係数も負で、固有の安全性がある・モジュール型高温ガス炉設計の場合、事故条件下でも燃料破損や炉心溶融が生じないように炉心出力密度を、設計上、厳しく抑制(3~6W/cm³)(参考:軽水炉~55W/cm³など)・耐震性は免震構造採用等で対応
2) 経済性	<ul style="list-style-type: none">・マルチモジュール方式のプラント設計。建設・運転単価が割安<ul style="list-style-type: none">－小型モジュール設計で、需要に応じて柔軟に増設等が可能－20万円/kWe以下(JAEA評価)(現行軽水炉:25~30万円/kWe)－先行投資が少なくて済む、またコスト回収が早期に可能・需要地近接立地が可能→電力や熱の輸送損失が極めて小・発電と幅広い熱利用(高~中~低温)が可能(地球規模で需要あり)・石油、天然ガス、石炭等資源価格が高騰中(2007年、原油80~100(今後~150~200?)\$/Barrel)、かつ炭素税導入検討→相対的に単価が低下

図2-2-3 高温ガス炉の次世代炉要件適合性(2/2)

次世代炉要件	高温ガス炉の適合性
3) 持続性	<ul style="list-style-type: none">・核燃料→原子炉内で数年間、燃料追加なしで燃焼が可能・発電に幅広い熱利用を加えると、総合熱利用効率が向上(約2倍に)・ウラン(U)、プルトニウム(Pu)に加えて、トリウム(Th)(資源量はUの3~5倍)も燃料(親物質)として利用可能・「高速増殖炉」に連結できる・化石燃料は、当該炉で改質すれば、今後とも大規模な資源、石油代替燃料として活用可能
4) 核不拡散性	<ul style="list-style-type: none">・核不拡散策、核物質管理は、IAEA国際査察制度等で対応
5) 物的防護性	<ul style="list-style-type: none">・炉心を地下式(または半地下式)に設計→大型航空機落下事故等にも耐えられる・高温(~1,000°C)システム→施設への人的接近は不可能
6) 水素製造性	<ul style="list-style-type: none">・高温の熱(850~950°C、将来は1,000°C以上)が利用可能→高効率かつ大量の水素製造が可能(原料は無尽蔵の水)
7) 海水 淡水化性	<ul style="list-style-type: none">・高~中温熱利用後の廃熱(100~150°C程度)を利用→低コストで海水淡水化が可能

図2-4-1 いつごろ、どれくらいの水素が必要か？

(出典)小川益郎、高温ガス炉プラント研究会講演、2007年11月16日、仙台



(WE-NET,平成12年度成果報告書タスク1,2001。燃料電池実用化戦略研究会,燃料電池実用化戦略研究会報告,2001。第12回燃料電池実用化戦略研究会,水素社会に向けたシナリオ(案)について,2004。)

図2-4-2 我が国の水素タウン・エコタウン構想(例)

(出典)土江保男、高温ガス炉プラント研究会講演、2007年11月16日、仙台

プロジェクト名、内容	背景、狙い	推進機関、期間等
<ul style="list-style-type: none"> ・むつ小川原環境・エネ産業創造特区 <ul style="list-style-type: none"> －太陽熱、風力、バイオ、原子力 (電力、水素) 	<ul style="list-style-type: none"> ・原子力と自然エネの共生 ・新事業、新産業の創出 ・水素社会への対応 	<ul style="list-style-type: none"> ・青森県、むつ小川原市、八戸市、東大、NEDOなど ・'03年～
<ul style="list-style-type: none"> ・むつ小川原ボーダレス・エネ・フロンティア構想 <ul style="list-style-type: none"> －風力、バイオ、天然ガス等 (電力、水素) 	<ul style="list-style-type: none"> ・水素を軸とした次世代エネ・システムの創出 	<ul style="list-style-type: none"> ・青森県 ・環境エネ産業創造特区との連携 ・'98年～
<ul style="list-style-type: none"> ・六ヶ所村水素タウン構想 <ul style="list-style-type: none"> －風力、バイオ(電力、水素) 	<ul style="list-style-type: none"> ・農業、産業の振興 	<ul style="list-style-type: none"> ・六ヶ所村、横浜町、日本風力開発
<ul style="list-style-type: none"> ・大洗町水素利用検討会 (水素) 	<ul style="list-style-type: none"> ・産業振興、人材育成 ・分散型エネ・システム概念の好適地 	<ul style="list-style-type: none"> ・茨城県、大洗町 ・'04～'05年
<ul style="list-style-type: none"> ・やまぐちエコタウン構想 (水素) 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数コンビナート、副生水素 	<ul style="list-style-type: none"> ・山口県、周南市 ・'04年～
<ul style="list-style-type: none"> ・周南水素タウン構想 (水素) 	<ul style="list-style-type: none"> ・次世代コンビナート形成 ・水素社会 	<ul style="list-style-type: none"> ・周南市

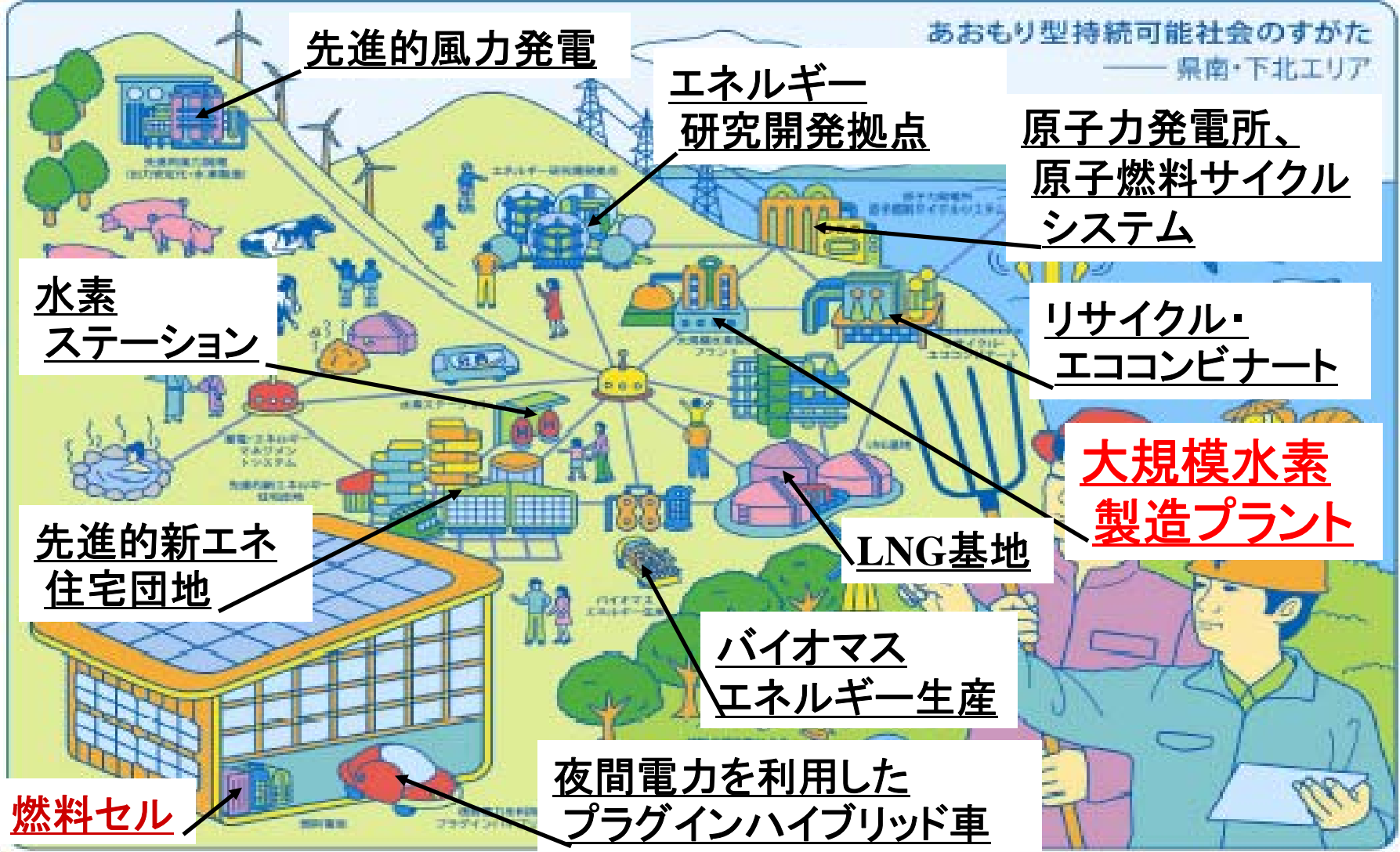


図2-4-3 ボーダレス・エネルギーフロンティア、水素タウン(構想例)

(あおり型持続可能社会の姿—県南・下北エリア)

(出典)三村申吾:むつ小川原エネルギー産業振興フォーラム、2007年2月、東京

図3 高温ガス炉導入・水素製造の炭酸ガス削減効果

(需要や導入の想定規模に依存するが、顕著な削減が期待できる)(原産、2007年)

評価ケース	基準年	評価年	削減効果(試算例)
<評価例-1>			
・燃料電池自動車(日本)	現在	2050	日本の総排出量に対し 4%
・水素還元製鉄(〃)	現在	2050~	〃 〃 〃 2~4%
<日本 小計: 6~8%>			
・燃料電池自動車(世界)	2000	2050~	世界の総排出量に対し 21%
・水素還元製鉄(米国、中国)	現在	2025	米国の総排出量に対し 0.05% 中国の総排出量に対し 0.2%
<世界 小計: 21%>			
<評価例-2>			
・製造(直接還元製鉄)(日本)	2000	2100	日本の総排出量に対し 2~4%
・〃(製鉄以外)(〃)	2000	2100	〃 〃 〃 $\alpha 1$
・民生(〃)	2000	2100	〃 〃 〃 $\alpha 2$
・輸送(燃料電池自動車)(〃)	2000	2100	〃 〃 〃 5%
・(その他<飛行機等>)(〃)	2000	2100	〃 〃 〃 $\alpha 3$
<日本 小計: 7~9 + $\alpha 1$ + $\alpha 2$ + $\alpha 3$ %>			

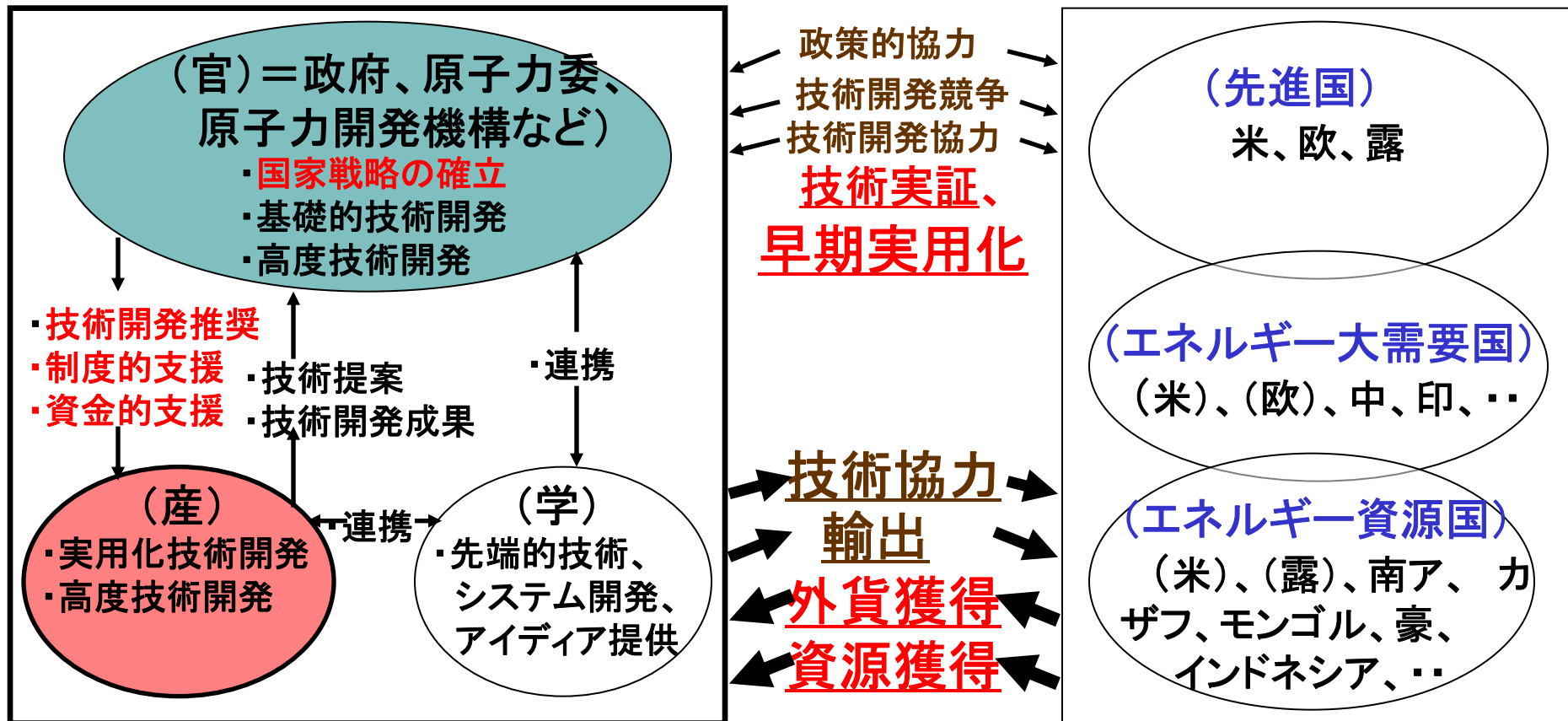
図4-1 日本のエネルギー/環境/原子力開発戦略の望ましい姿

(イメージ)

(産/官/学が一体となって国家戦略として取組む) (「技術」で「資源」を入手・確保)

<日本>

<外国>



技術開発リード、技術継承、国際協力、
輸出、外貨獲得、各種資源獲得
(エネルギー、産業、食糧、水...)

省エネ技術、高温ガス炉/
熱利用技術の国際的浸透

図4-2 我が国が必要とする各種資源と資源国

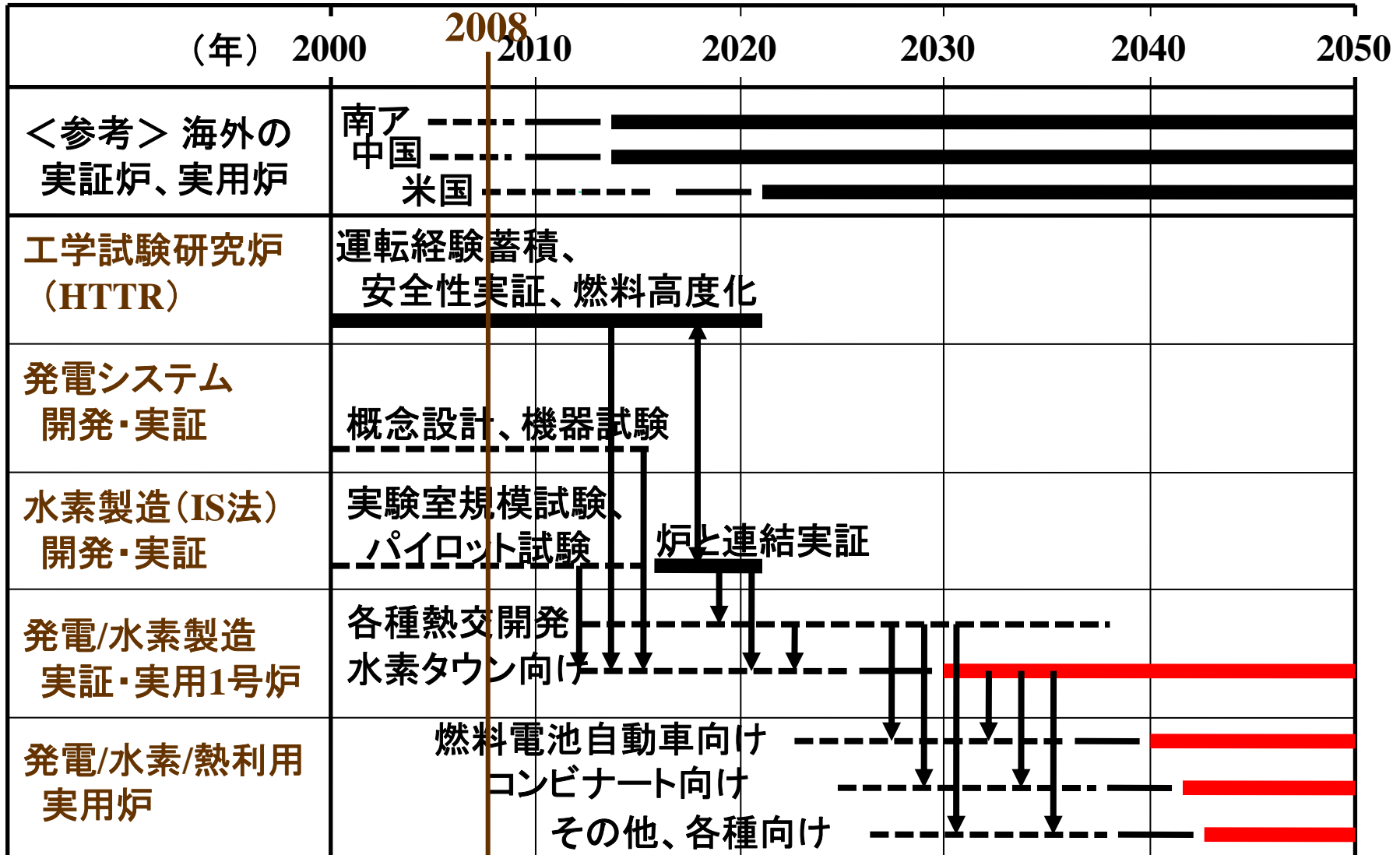
(資源国に技術協力し、代わりに資源を獲得)

- 我が国が必要とする各種資源
 - エネルギー資源
 - 化石資源
 - 石油、石炭、天然ガス、ウラン、..
 - 再生可能エネルギー資源
 - バイオマス、..
 - 産業用資源(原材料)
 - 鉄、銅、..
 - 希少金属(レアメタル)
 - ニッケル、クロム、チタン、タンゲステン、ジルコニウム、コバルト、マンガン、..
 - 水(飲用、工業用、農業用)
 - 食糧
 - 穀物、肉類、魚介類
- 資源国
 - 北米(米国、カナダ)
 - 石油、石炭、天然ガス、オイルサンド、穀物、肉類、魚介類..
 - 南米(ブラジル、アルゼンチン..)
 - 石炭鉄鉱石、オイルシェール、穀物、肉類、魚介類..
 - 欧州、旧ロシア(ロシア、カザフ..)
 - 石油、天然ガス、ウラン..、水、魚介類..
 - アジア、オセアニア(中国、インド、インドネシア、豪州..)
 - 石炭、天然ガス、ウラン、トリウム、バイオマス、穀物、魚介類..
 - 中東、アフリカ(イラン、イラク、サウジアラビア、リビア、南ア..)
 - 石油、天然ガス、ウラン、マンガン、シリコン、プラチナ、クロム、魚貝類..

図4-3 我が国の高温ガス炉実用化ロードマップ(イメージ)

(国際協力等により前倒しもあり得る)

(2008年現在)



--- (設計、許認可); — (建設); ■ (運転)

Intermediate Heat Exchanger



Heatrix

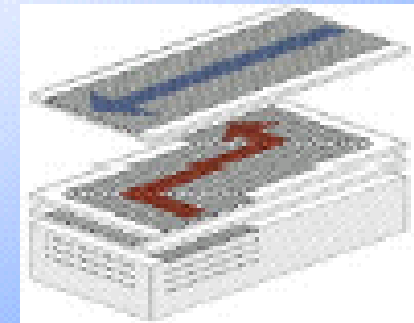
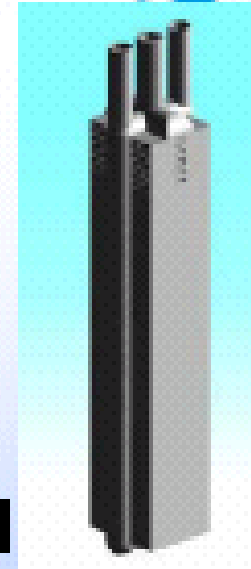


図5 各種熱交換器

(実用化に向けて、各用途に向けた熱交換器の開発が必要)

(出典) K.Verfondern (FCZJ); IAEA Conf. on Non-Elec.Applications
of Nuc.Power, Apr.16-19, 2007, Oarai, Japan

図6 高温ガス炉の実用化(まとめ)

(なぜ、誰が、何を、いつ、どこで、いかに?)

5W1H	内 容
なぜ (Why)?	<ul style="list-style-type: none">・資源(エネルギー、鉱物..)の需・給が逼迫、価格が急騰・地球温暖化が顕著に進行・原子力利用拡大も発電のみでは限界あり
誰が (Who)?	<ul style="list-style-type: none">・我が国が、国として、かつ国際的リーダーとして(リード、推進)・官、産、学、地方が(一致協力、役割分担して)
何を (What)?	<ul style="list-style-type: none">・原子力の大幅な拡大利用(発電+水素製造等各種熱利用)を..・それを含む国家エネ/環境/経済戦略を確立し、国際展開を..・それにより必要な資源(エネルギー資源、鉱物、食糧、水)を獲得
いつ (When)?	<ul style="list-style-type: none">・2020~2030年頃までに、プラント規模実証を..・2030~2050年頃までに、実用化展開を..
どこで (Where)?	<ul style="list-style-type: none">・(実証) 国内(水素タウン、エコ・コンビナート..)、または海外で・(実用化) 世界で(先進国、途上国)
いかに (How)?	<ul style="list-style-type: none">・日本が技術開発でリードして、輸出して、あるいは国際協力・貢献しながら..・徐々に、できるところから、地球的視野で、国家戦略的に..