



キヤノングローバル戦略研究所  
The Canon Institute for Global Studies

発表資料

# 【基調講演】 高温ガス炉が拓く 革新的低炭素エネルギーシステム

加藤之貴

(かとうゆきたか)

東京工業大学 原子炉工学研究所准教授  
yukitaka@nr.titech.ac.jp, Phone: 03-5734-2967

CIGS エネルギー2050研究会 シンポジウム  
地球温暖化問題に対する原子力開発の役割  
－高温ガス炉と廃棄物消滅処理について－  
平成26年2月24日(月) 14:20-14:50

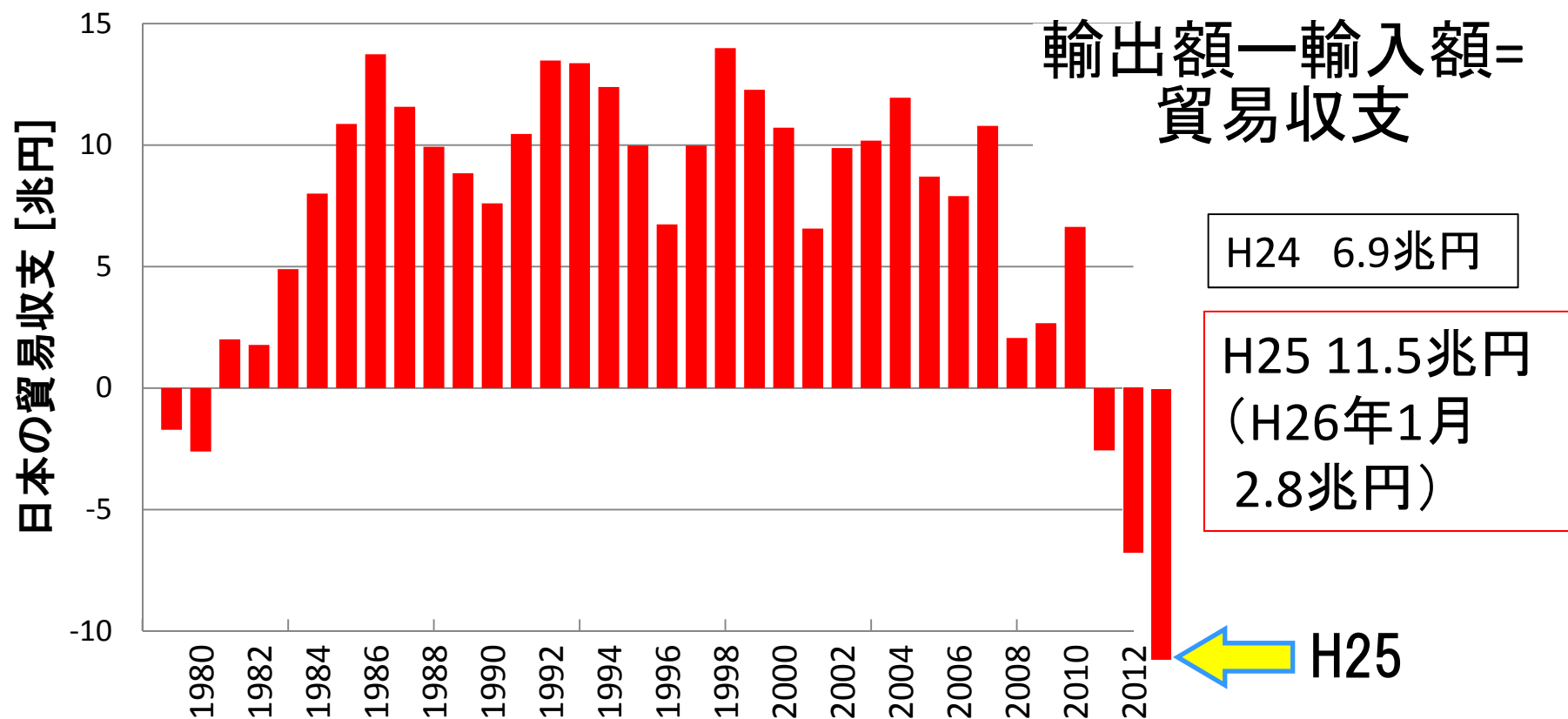


# 発表内容

- **日本のエネルギー的理解**
- **高温熱の産業における必要性**
- **高温ガス炉を用いた革新的低炭素エネルギー技術**
  - (1) 水素製造**
  - (2) 燃料改質**
  - (3) 炭素循環**
- **まとめ**



# 貿易収支



- H23以後、31年ぶりの赤字。
- H25 輸入液化天然ガス (7.0兆円←3.5兆 (H22 大震災前))、原粗油等の増加。

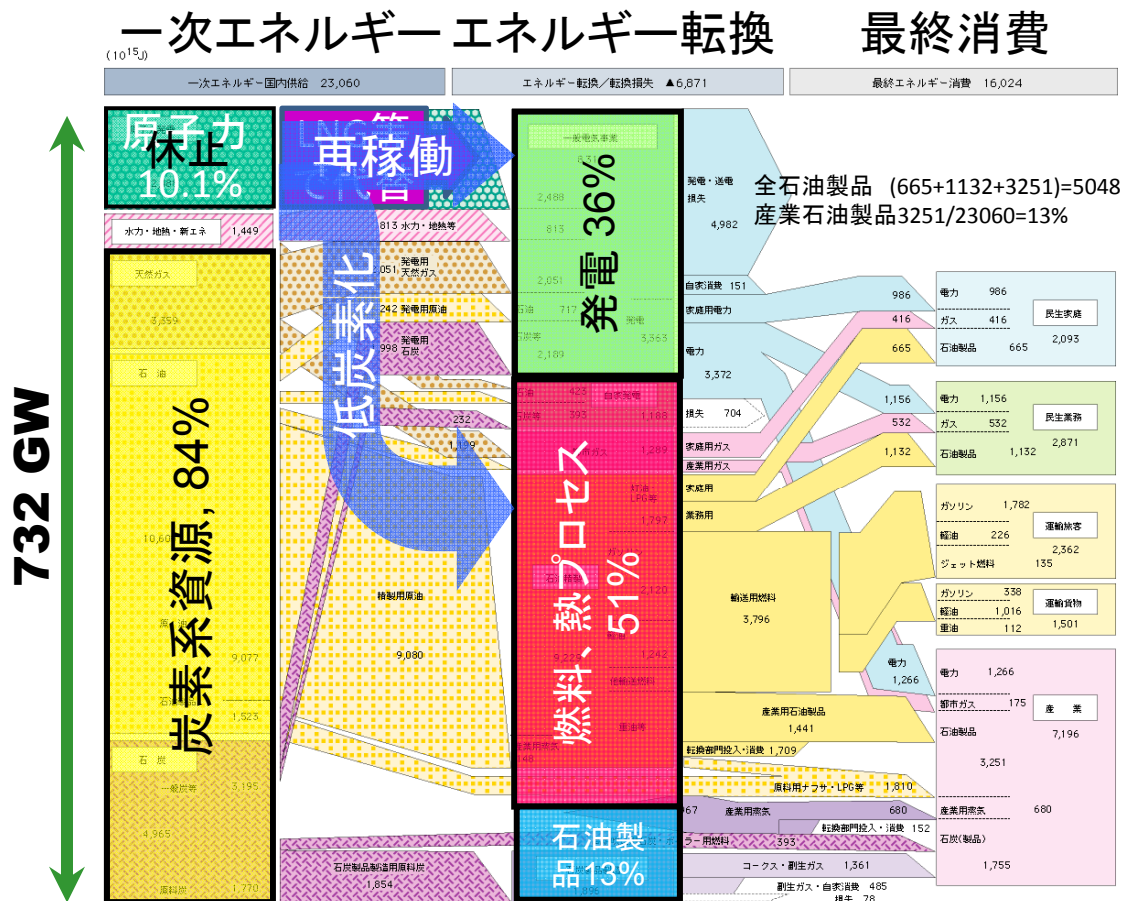
財務省H25輸出・輸入確報、貿易統計など  
[http://www.customs.go.jp/toukei/shinbun/trade-st/2013/2013\\_115.pdf](http://www.customs.go.jp/toukei/shinbun/trade-st/2013/2013_115.pdf)  
<http://www.customs.go.jp/toukei/suii/html/time.htm>



# 日本のエネルギー収支 —低炭素化の方向—

- 炭素系エネルギーは全エネルギーの95%、ほぼ全量輸入。
- 全炭素資源の8割以上が燃料・熱として消費。  
→CO<sub>2</sub>排出増、輸入エネルギーの高コスト化、国際競争力低下
- 低炭素化に向けて熱供給源として非化石燃料への代替が重要  
→原子力利用による低炭素化

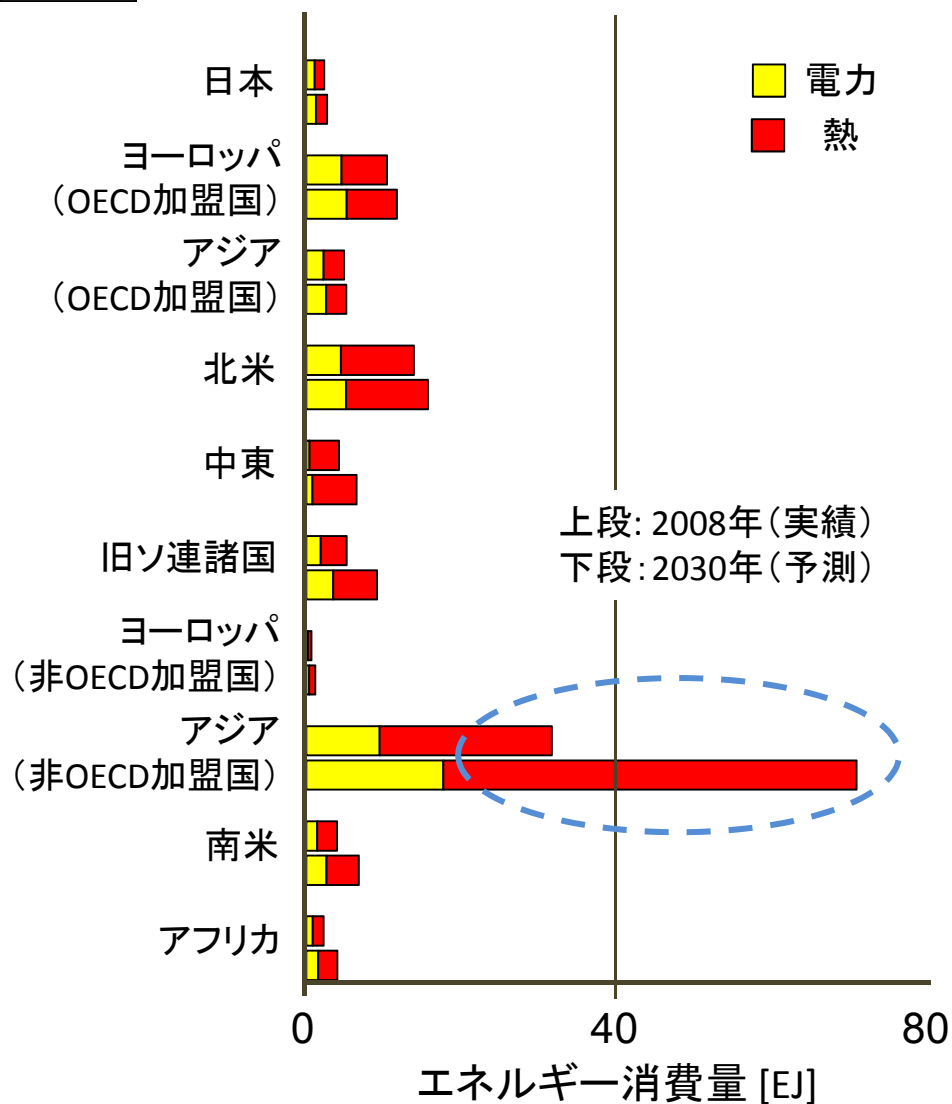
非化石燃料の利用によるエネルギー国際価格交渉力の担保



わが国の炭素収支(2004年基準、%は全一次エネルギー比)  
エネルギー白書2006年版、【第201-1-3】我が国のエネルギーバランス・フロー概要(2004年度)  
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2006EnergyHTML/html/i2000000.html>



# 世界の産業分野における電力及び熱需要



- ✓ アジア(非OECD加盟国)は2030年までにエネルギー消費量の大幅な増加が見込まれる。
- ✓ 産業向け、アジア向けに高温ガス炉の需要の可能性はある。

図 産業分野における電力及び熱消費量の実績及び予測

電力: OECD IEA, Energy Balances of Non-OECD Countries: 2007–2008 (2010 edition), OECD, Paris (2010).  
OECD IEA, Energy Balances of OECD Countries: 2007–2008 (2010 edition), OECD, Paris (2010).  
熱: OECD IEA, Energy Statistics of Non-OECD Countries: 2007–2008 (2010 edition), OECD, Paris (2010).  
OECD IEA, Energy Statistics of OECD Countries: 2007–2008 (2010 edition), OECD, Paris (2010).  
需要予測: US EIA, International Energy Outlook 2013, DOE/IEA-0484 (2013).



# 高温ガス炉と高温熱利用

- **高温熱の製造**
  - 高温ガス炉(**HTGR**)は**950°C**の高温熱製造ができる。
- **高温熱を利用した革新的低炭素エネルギー技術**
  - (1) **燃料・素材としての水素製造**
  - (2) **燃料改質による化石燃料節約**
  - (3) **炭素循環によるCO<sub>2</sub>排出削減**

**950°Cの高温熱出力  
(世界最高)**



JAEA高温工学試験研究炉(HTRR)  
<http://htrr.jaea.go.jp/index.html>



# 高温の必要性

- 高温は質が高いため、効率の良い発電、物質製造ができる

例： 燃焼温度と発電効率

発電方式	燃焼温度	発電効率
ガス複合サイクル	>1300°C	54%
石炭火力	>600°C	44%

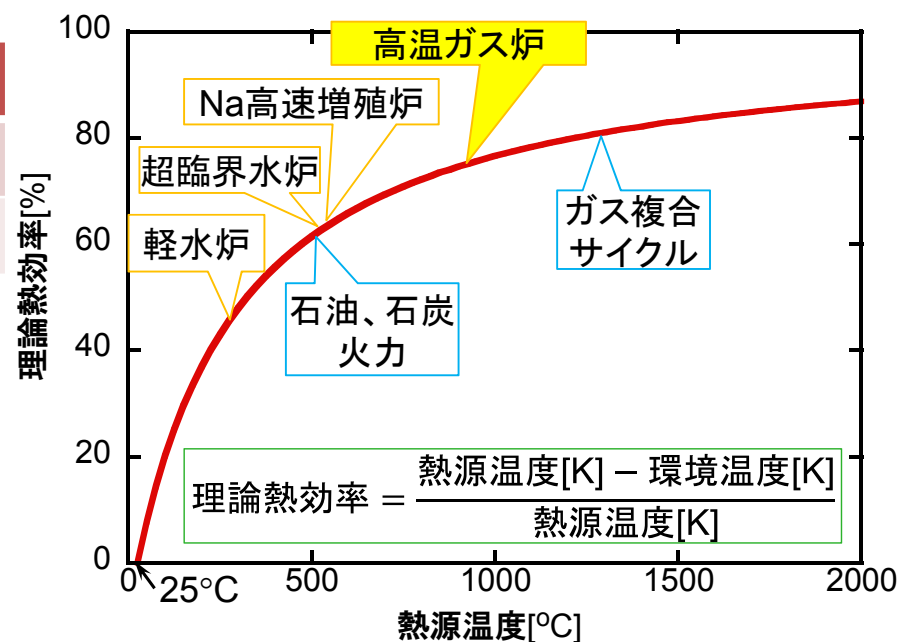


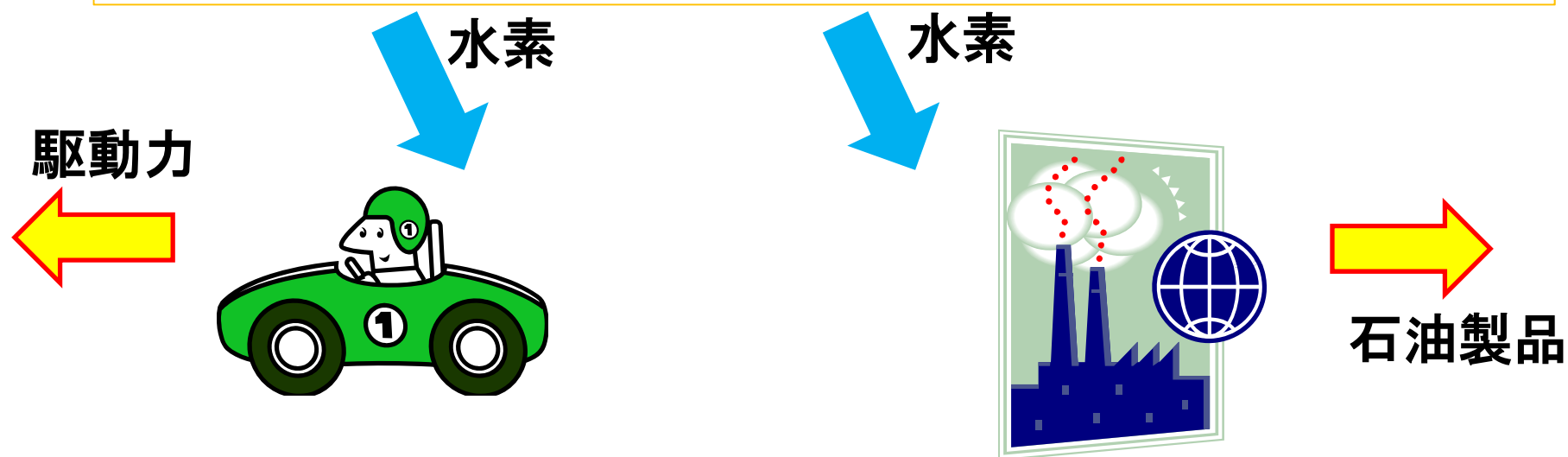
表 各種発電装置の出力温度と理論発電効率の関係 (環境温度=25°C)



# 低炭素エネルギー技術(1) 水素

高温ガス炉(High Temperature Gas-cooled Reactor, **HTGR**)の高温で高効率に水素が作れる。

- 燃料電池の燃料
- アンモニア、マーガリン、化粧品などの原料
- 化石燃料の節約、低炭素化



燃料電池自動車、HONDA Claris  
<http://www.honda.co.jp/news/2007/4071115a.html>

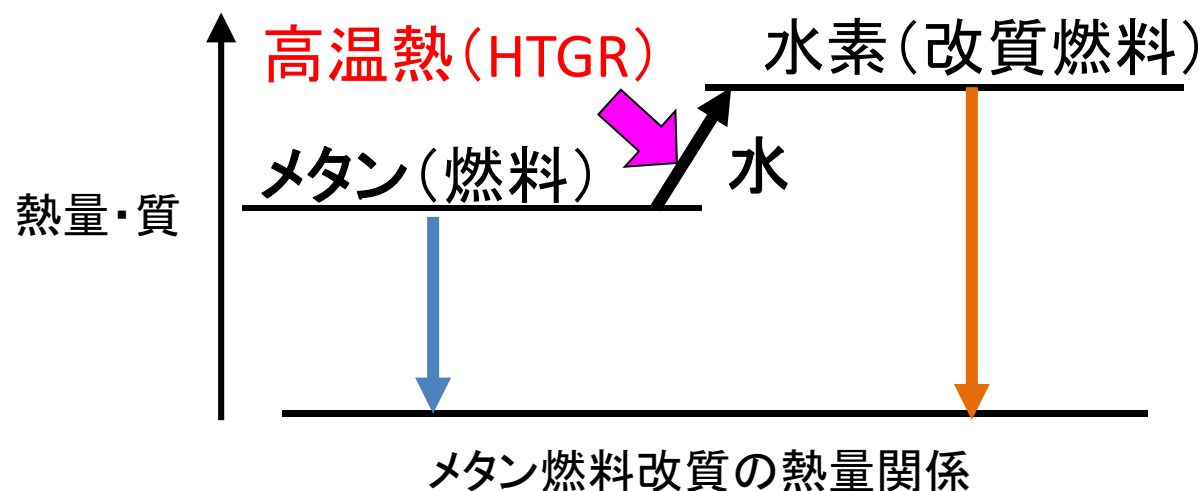
石油化学プラント, JX日鉱日石鹿島  
[http://www.jgc.co.jp/jp/02bisdmn/02petroleum\\_refining/exp\\_ibaraki2.html](http://www.jgc.co.jp/jp/02bisdmn/02petroleum_refining/exp_ibaraki2.html)





## 低炭素エネルギー技術(2) 燃料改質

- 改質：燃料に熱を加えて水蒸気と反応させ、燃料のエネルギーを増大（=改質）させること。
- 高温熱が必要。高温ガス炉の高温熱が最適。



メタンの場合のエネルギー増加率  
= 水素/メタン  
= 28%増加

### 派生技術

- 様々な炭化水素からの水素製造
- 石炭の軽油化、CTL (Coal To Liquid)
- 天然ガスの液体燃料化、GTL (Gas To Liquid)



# 中国における熱需要のある産業と改質技術

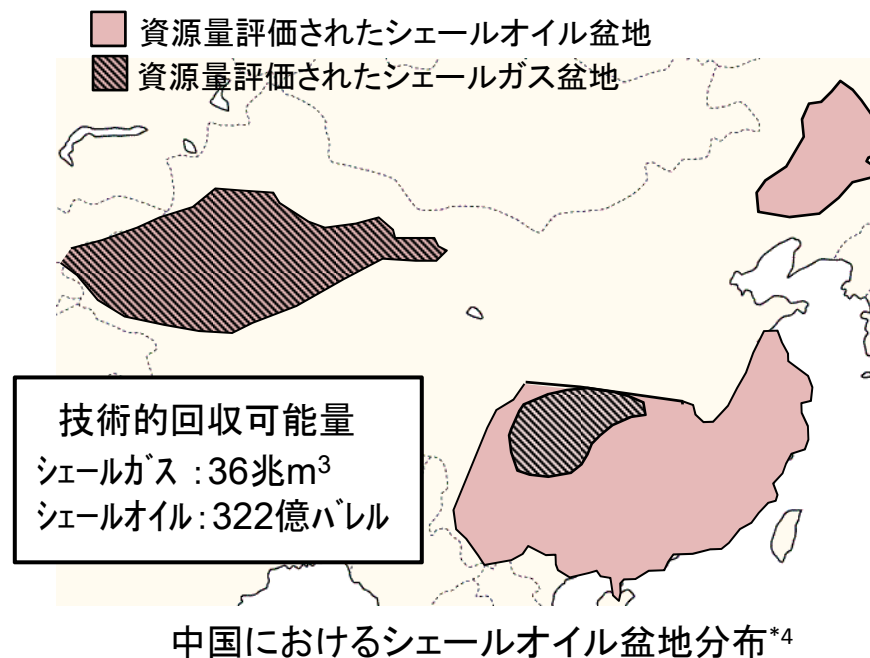
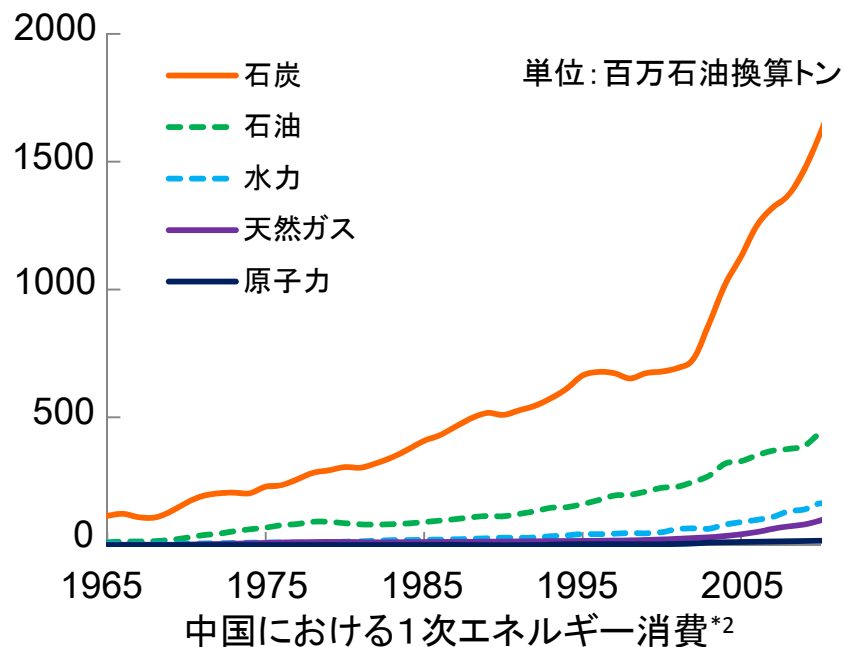
石炭軽油化(Coal To Liquid)

←改質: 熱、水素

シェールオイル・ガス回収プロセス←熱

- 1次エネルギーの70%が石炭→環境問題
- 2020年に1次エネルギーの石炭の割合を60%に低減を提起\*1。

- 2020年の天然ガス消費量は現在の2.5倍に増える\*1。
- 中国には世界のシェールオイル・ガスの技術的回収可能量の約19%・9%が存在\*3。



\*1 1 JOGMEC, 中国のシェールガス開発近況 (2013).

\*2: BP, Statistical Review of World Energy 2013 (2013).

\*3: US EIA, World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 regions Outside the United States (2011).

\*4: JOGMEC, 世界のシェールガス・オイルの資源量評価を考察する, (2013).



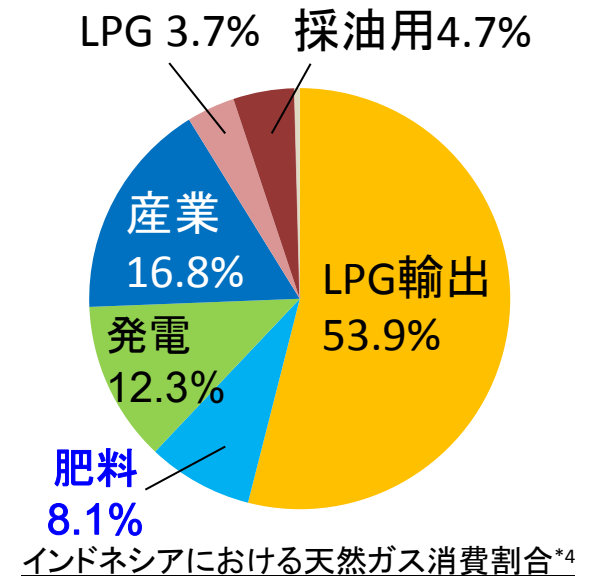
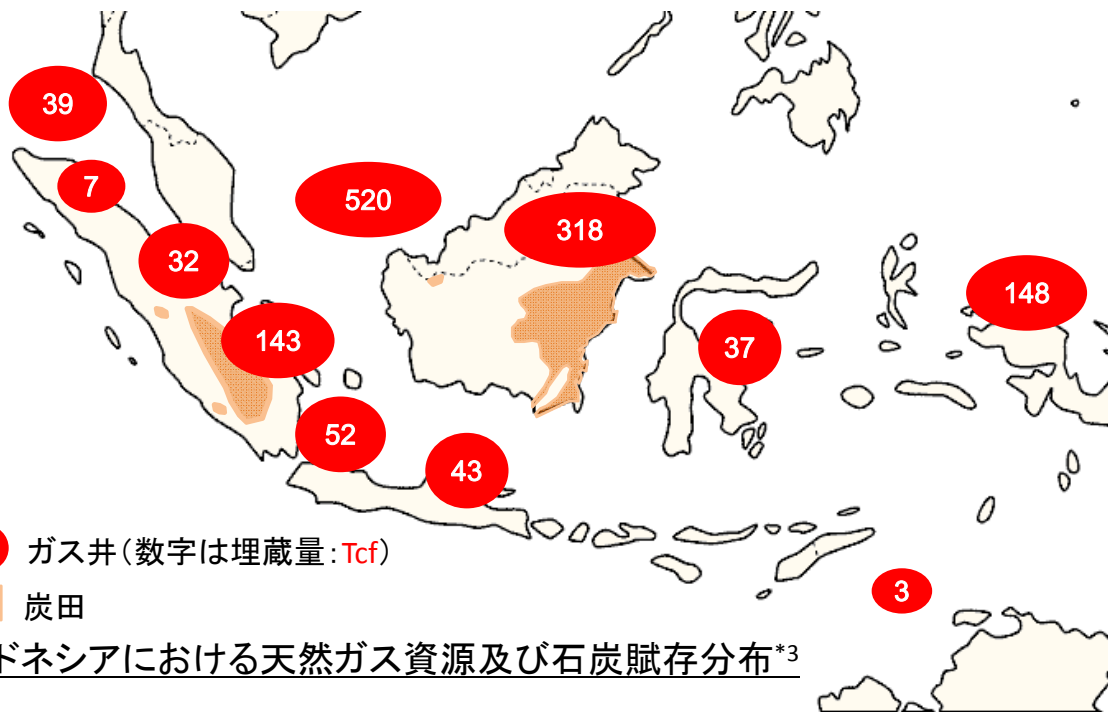
# インドネシアにおける熱需要のある産業

CTL及びGas To Liquid ← 熱、水素

アンモニア製造プロセス  
← 熱、水素

- パイプラインネットワークが未整備。遠隔地のガス田が未開発\*1。
- 石炭資源は豊富であるが節約を考え低品位炭の利用、改質技術に積極的\*2。

- 資源温存のため、LNG輸出の大幅削減。
- 国内の天然ガス消費に占める肥料産業(アンモニア製造)の割合が大きい。



インドネシアにおける天然ガス資源及び石炭賦存分布\*3

インドネシアにおける天然ガス消費割合\*4

\*1 JOGMEC, インドネシアにおける公団GTL技術の適用性に関するフィージビリティ・スタディ(プルタミナとの共同スタディ)(2001).

\*2 石炭エネルギーセンター, インドネシアの石炭輸出規制及び石炭開発状況調査, 平成24年度JOGMEC石炭開発部調査事業成果報告会(2013).

\*3: IEEJ, インドネシアの石油・天然ガス: その現状と課題(2006).

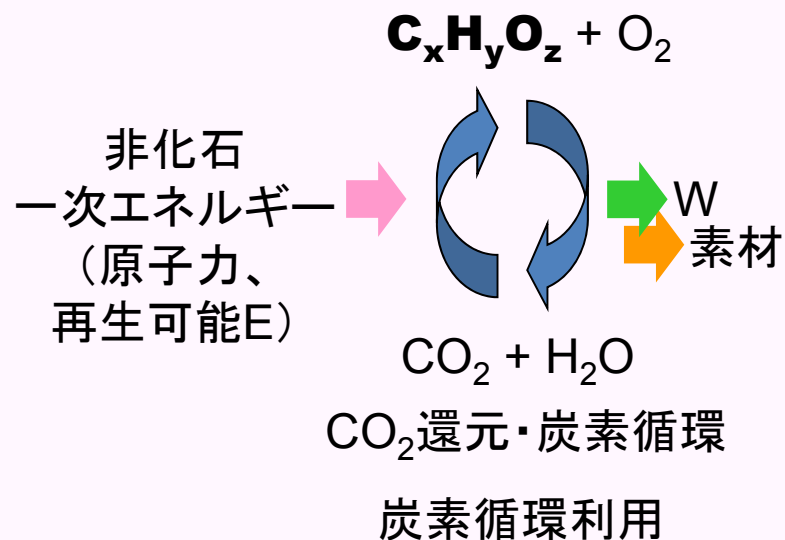
\*4: IHI, インドネシアでの褐炭ガス化技術(二塔式ガス化炉)普及への取り組み, C C Tワークショップ2013(2013).



# 高温ガス炉の熱利用(3)炭素の循環利用

## 能動的な炭素循環 エネルギーシステム\* ACRES, Active Carbon Recycling Energy System

\*Y. Kato, *ISIJ Int.*, 50, 181-185 (2010).  
加藤ら: 日本特許 特願2010-006238



### 炭素循環の利点:

- CO<sub>2</sub>排出削減
- CCS代替技術
- 既存インフラが利用できる。

**ACRES**の概念構成



# 高温ガス炉を用いた熱利用プロセス(1) スマート製鉄プロセス

化石燃料の集約消費産業への高温ガス炉の適用→燃料消費、CO<sub>2</sub>排出削減

日本の製鉄が世界のリーダーで  
あり続けるため  
→世界一の連携、iACRES

世界最高の  
製鉄技術

世界最高の高温  
ガス炉技術

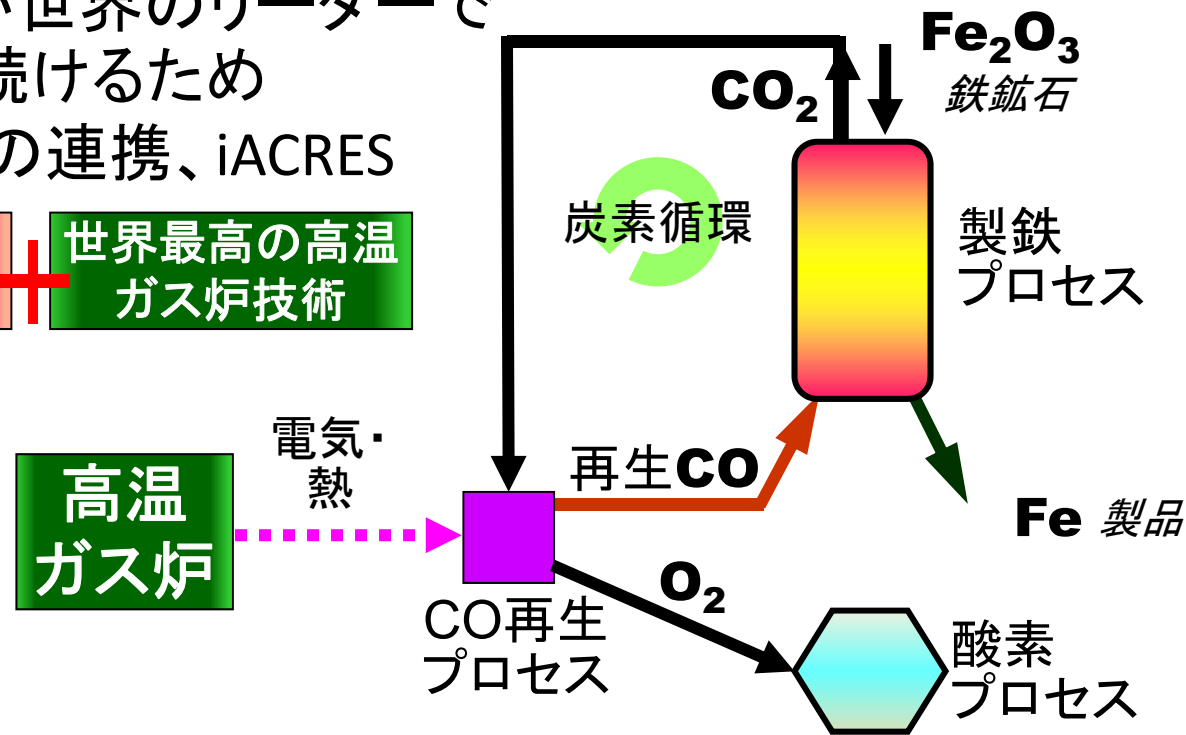


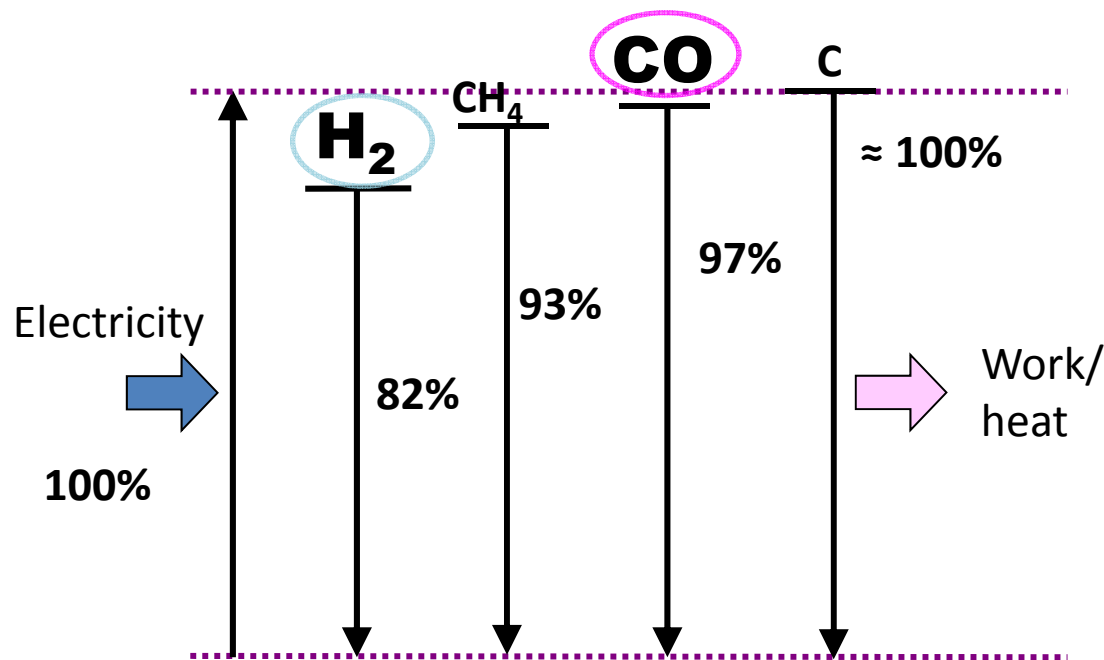
図 炭素循環型スマート製鉄システム,iACRES

Y. Kato, *ISIJ Int'l*,  
50(1), 181(2010).

日本鉄鋼協会 炭素循環製鉄研究会 (ACRES研)  
(H23~25、委員長 加藤之貴)

# 炭素と水素の質的關係

Exergy, エネルギーの質:  
電気  $\approx$  **C** > **CO** > CH<sub>4</sub> > **H<sub>2</sub>**



■ COはH<sub>2</sub>に対して質（エクセルギー）が高い  
→ 高密度エネルギーキャリア

Fig. 炭素系と水素のエクセルギー



# CO<sub>2</sub>高温電気分解

固体酸化物型電気分解, SOEC(Solid Oxide Electrolysis Cell)

二酸化炭素電気分解:  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 1/2\text{O}_2$

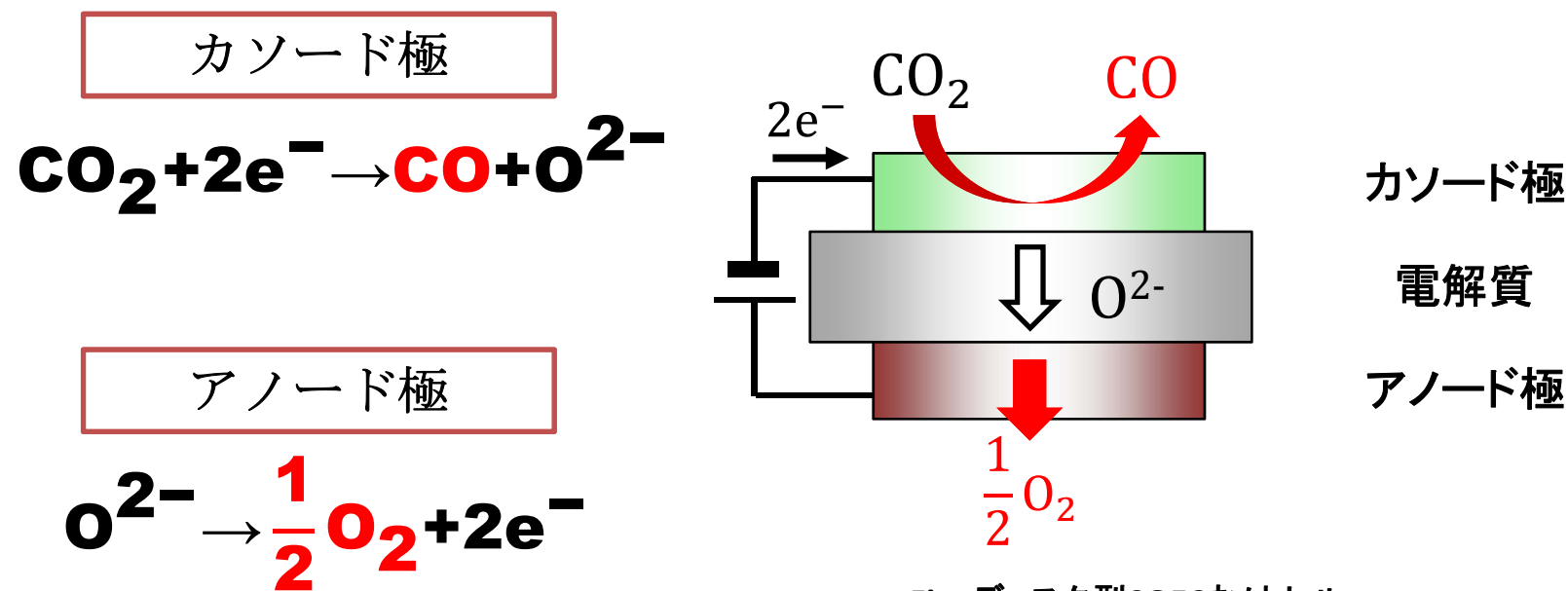


Fig. ディスク型SOECむけセル

Dipu, Kato, *ISIJ Int'l*, 52, 1427 (2012).



# メガソーラーの進展

扇島太陽光発電所, 東京電力,  
13 MW, 23 ha



<http://www.city.kawasaki.jp/300/cmsfiles/contents/0000021/21805/h231219.pdf>

<参考> 計画公表済のメガソーラー発電所 (2012年2月末現在、0.5 kW未満の計画を除く)

電力	地点数	概算導入量 (千kW)	既運開量 (千kW)	運転開始 時期	備考
北海道	1	1	1	2011.6	伊達ソーラー発電所
東北	3	1.5	1.5	2011.12	八戸太陽光発電所
		2		2012年度	仙台火力発電所構内に建設
		1		2013年度 <sup>(※1)</sup>	原町火力発電所構内に建設
東京	3	7	7	2011.8	浮島太陽光発電所
		13	13	2011.12	扇島太陽光発電所
		10	10	2012.1	米倉山太陽光発電所
中部	3	7.5	7.5	2011.10	メガソーラーたけとよ
		1	1	2011.1	メガソーラーいいだ
		8		2014年度	静岡県静岡市に建設(自社所有地)
北陸	4	1	1	2011.3	志賀太陽光発電所
		1	1	2011.4	富山太陽光発電所
		1		2012年度	石川県珠洲市に建設 (自社所有地・珠洲市所有地)
		1		2012年度	福井県坂井市に建設(自社所有地)
関西	4	10	10	2011.9 <sup>(※2)</sup>	堺太陽光発電所
		18		未定	大阪府堺市に建設(シャープとJV)
		0.5		2013年度	福井県大飯郡おおい町に建設
		0.5		2014年度	福井県大飯郡高浜町に建設(調整中)
中国	2	3	3	2011.12	福山太陽光発電所
		3		2014年度	山口県宇部市に建設
四国	1	4.3 <sup>(※3)</sup>	2	2010.12	松山太陽光発電所の一部が運転開始
九州	2	3	3	2010.11	メガソーラー大牟田発電所
		3		2013年度	長崎県大村市に建設(発電所跡地)
沖縄	2	4	4	2010.10	宮古島メガソーラー実証研究設備
		1		2011年度	沖縄県名護市に建設(名護市所有地)
計	25	106.3	65		

※1:平成22年度供給計画記載。東日本大震災の影響により見直し検討中。

※2:2010年10月に一部運転開始。

※3:2020年度までに4.3千kW全て運転開始予定。

## 電気事業連合会

[http://www.fepec.or.jp/environment/new\\_energy/seiki/sw\\_index\\_01/index.html](http://www.fepec.or.jp/environment/new_energy/seiki/sw_index_01/index.html)





# 製鉄炉の所要エネルギー

炉種類	設置組織	設置場所	製造速度 [t/h]	投入エネルギー量[MW]
高炉	新日鉄住金	君津第3高炉	377	1539
直接製鉄 (Midrex)	神戸製鋼	OXY+ practice -2000	129.2	427
キュポラ	ナニワ炉機	国内製造会社	18.5	17.1
キュポラ	日本鑄物協会 (1968)	標準No.22	10.5	12.0
PSM	住友金属	波崎研究開発 C	1.0	1.4
太陽電池	東京電力	扇島		(出力13)

原子力の対応  
できる規模

再生可能エネルギーが  
対応可能な規模

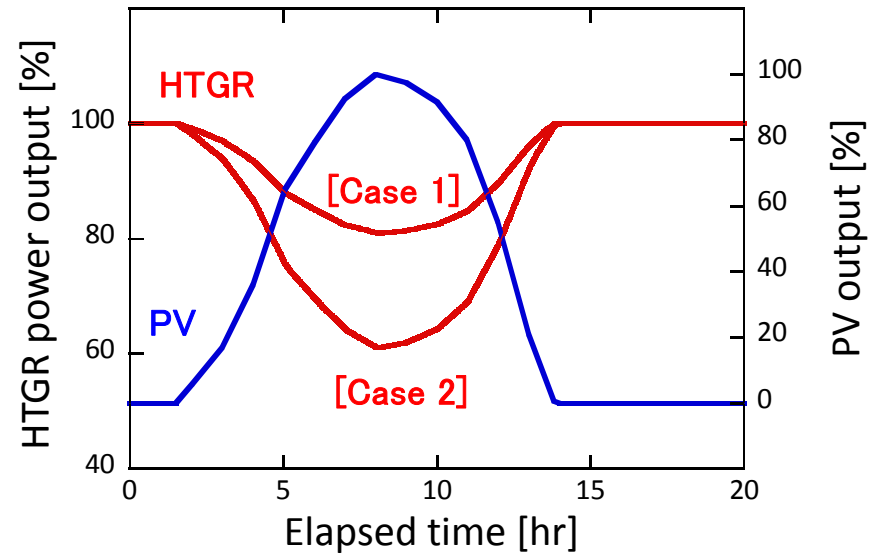


# HTGRと太陽電池

HTGRは太陽光発電(PV)  
の出力変動に対応可能

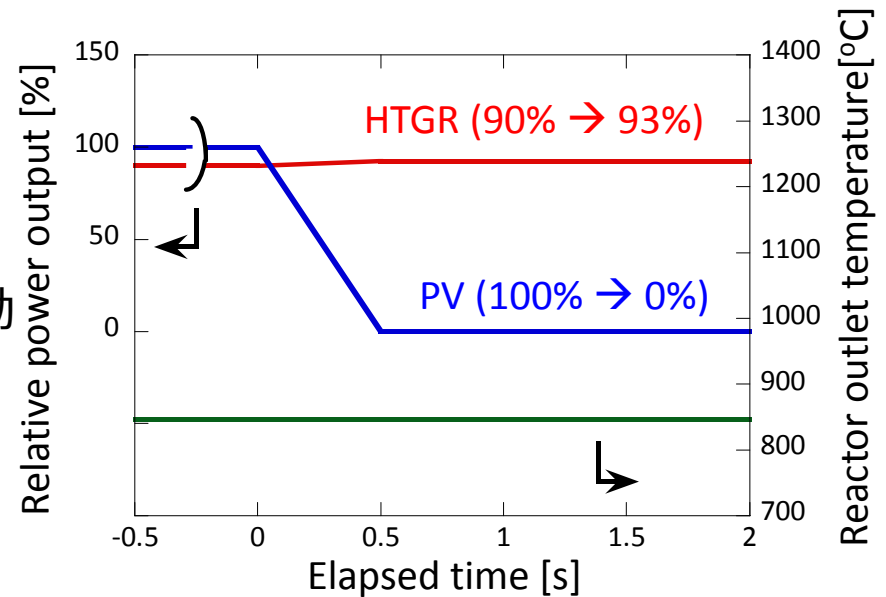
## 長周期変動（時間）への追従

太陽光発電の日間出力変動\*1への対応  
(朝5:30 0% → 昼12:30 100% → 夕18:00 0%)



## 短周期変動（秒）への追従

発電パネル上空に雲が通過する場合\*2の出力変動



\*1 METI, "火力発電・水力発電による太陽光パネルの出力変動対策"  
<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90126a12j.pdf> (Accessed on 8/21/2012)

\*2 C. Whitaker et al., "Distributed Photovoltaic Systems Design and Technology Requirements," SAND2008-0946 (2008).



# 高温ガス炉の導入可能基数

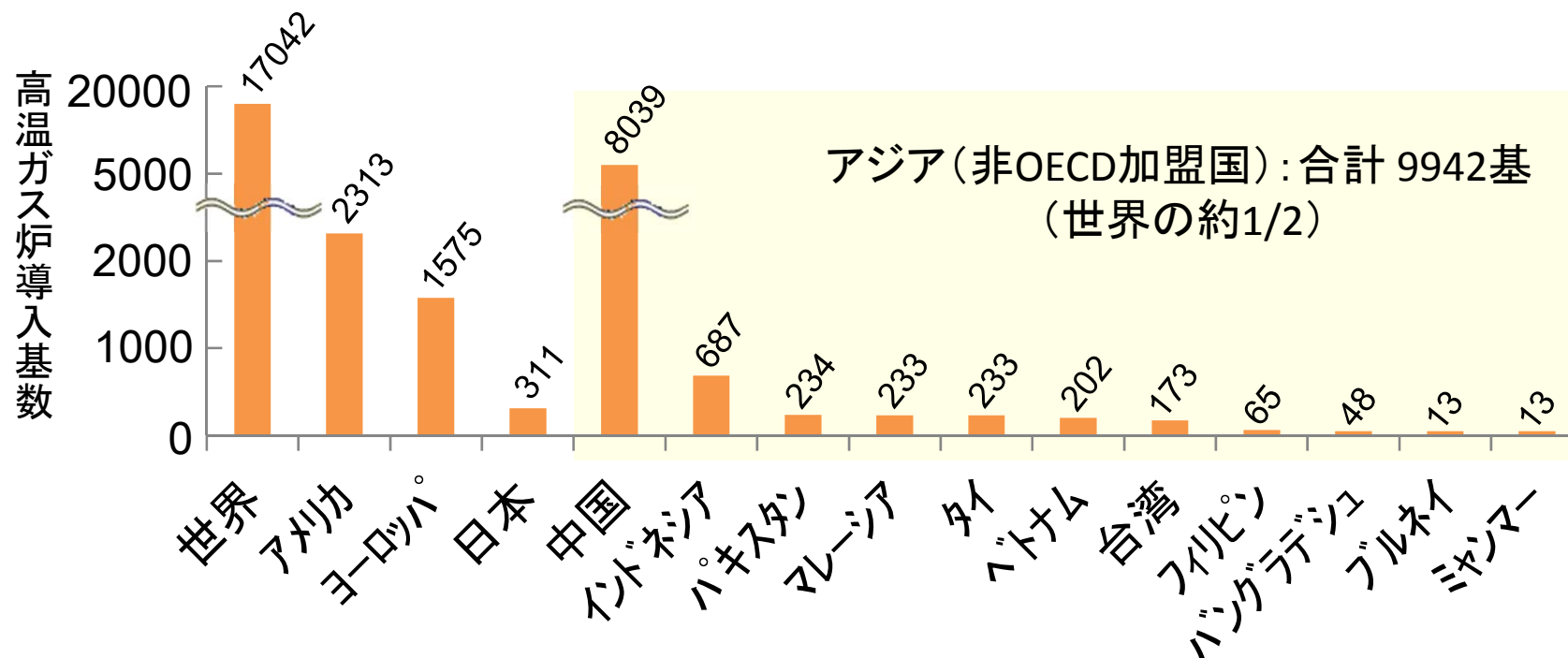
## ■ 試算条件

原子炉熱出力: 200MW/1基

稼働率: 90%

熱利用率: 80%

■ HTGRを用いた低炭素エネルギー技術の世界的な貢献性は大きい。



## 2030年の高温ガス炉の導入可能基数

## まとめ

- 高温ガス炉（**HTGR**）は高温熱源として利用でき、資源節約、**CO<sub>2</sub>**排出削減を大規模に両立できる。
- 高温ガス炉による革新的低炭素化の方法
  - 水素製造、燃料改質、炭素循環
  - 資源改質により資源消費の節約ができる。
  - 資源改質により資源の付加価値が高められる。
  - 炭素循環による**CO<sub>2</sub>**排出削減、**CCS**代替
- 将来展望：アジアが**HTGR**熱供給システムの大きな市場。
  - 日本が世界一の**HTGR**低炭素システムをセットで提供。



ご清聴ありがとうございました。

加藤之貴

yukitaka@nr.titech.ac.jp