

水素社会の実現に向けた方向性/ 様々な水素製造方法の比較検討

東京農工大学工学府
専門職学位課程 産業技術専攻
亀山秀雄



目次

- (1) 水素社会の実現の意義と課題
- (2) ISプロセスと他の水素製造プロセスの比較
- (3) まとめ

- 本年4月に策定された「エネルギー基本計画」では、近年の技術革新の進展を踏まえ、「水素をエネルギーとして利用する“水素社会”についての包括的な検討を進めるべき時期に差し掛かっている」とし、「将来の二次エネルギーでは、電気、熱に加え、水素が中心的役割を担う」という期待を表明している。

エネルギー基本計画(水素部分概要)(2014年4月11日閣議決定)

第3章第8節 3. “水素社会”の実現に向けた取組の加速

(1) 定置用燃料電池(エネファーム等)の普及・拡大

家庭用(エネファーム)は2030年に530万台導入することを目標に、市場自立化に向けた導入支援や技術開発・標準化を通じたコスト低減を促進。

業務・産業用も早期実用化を目指し技術開発や実証を推進。

(2) 燃料電池自動車の導入加速に向けた環境の整備

2015年から商業販売が始まる燃料電池自動車の導入を促進するために、規制見直し等によって水素ステーション100ヶ所整備の目標を達成するとともに、低コスト化のための技術開発等によりステーションの整備を促進。

(3) 水素の本格的な利活用に向けた水素発電等の新たな技術の実現

水素の利用技術の実用化については、水素発電にまで広がっていくことが期待。技術開発を含めて戦略的な取組を今から着実に推進。

(4) 水素の安定的な供給に向けた製造、貯蔵・輸送技術の開発の推進

水素をより安価で大量に調達するため、先端技術等による水素の大量貯蔵・長距離輸送など、水素の製造から貯蔵・輸送に関わる技術開発等を今から着実に推進。

(5) “水素社会”の実現に向けたロードマップの策定

“水素社会”の実現に向けたロードマップを本年春を目途に策定し、その実行を担う産学官による協議会を早期に立ち上げ。

2.水素エネルギーの意義(昔から繰り返し言われていること)

- 近年の地球温暖化等のエネルギーを巡る問題が深刻化する中で、将来的なエネルギーとして水素の利用が注目されている。
- 国内に資源が乏しく、エネルギーの大部分を海外の化石燃料に依存している日本にとって、水素は、「エネルギーの有効活用」や「エネルギー効率の向上」を通じて「エネルギー供給源の多様化」や「環境負荷の低減」に資すると考えられる。また、利用用途によっては「非常時対応」の観点からの有益。

エネルギー供給源の多様化

- 水素は、自然には単独で存在しないが、水素源の一つである水は地球上に無尽蔵に存在。
- 化石燃料だけでなく、太陽光、バイオマス等の再生可能エネルギーからの製造も可能。

環境負荷の低減

- 利用段階でCO₂を排出しない。燃料伝ちの場合はエネルギー効率が高く、省エネ・省CO₂に寄与。
- 再生可能エネルギーから製造された水素であれば、製造から利用までの全過程でCO₂フリー。

水素エネルギー利活用の意義

エネルギーの有効活用

- 地域的な偏りや時間による変動等の問題を抱える再生可能エネルギーを含む、様々なエネルギーを大量に貯蔵・輸送することが可能。
- 送電線のような大規模なインフラによらず、トレーラーや船舶での輸送が可能。

エネルギー効率の向上

- 定置用燃料電池の発電効率は35~60%。電気と熱を併せた総合エネルギー効率は80%超。
- 燃料電池自動車のエネルギー効率は35%程度

非常時対応

- 分散型エネルギーである定置用燃料電池や、非常時の電力供給も可能な燃料電池自動車はレジリエンスの観点から重要

3. 水素利活用技術の適用可能性

現在

実用化段階

将来

工業プロセス利用



提供: JX日鉱日石エネルギー

精製精製



光ファイバー製造

宇宙



ロケット燃料

輸送



燃料電池自動車 (FCV)

民生用



家庭用燃料電池 (エネファーム)

発電



水素発電
業務・産業用燃料電池

民生用



ポータブル
燃料電池

特殊用途



調査用潜水艇
潜水艦等

核種補助電源



冷凍トラック
特殊車両等

輸送



業務用車両
(燃料電池バス、フォークリフト)



水素燃料船
燃料電池船



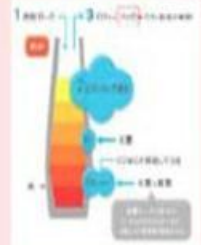
燃料電池鉄道車両

燃料電池スクーター



水素ジェット飛行機
燃料電池飛行機

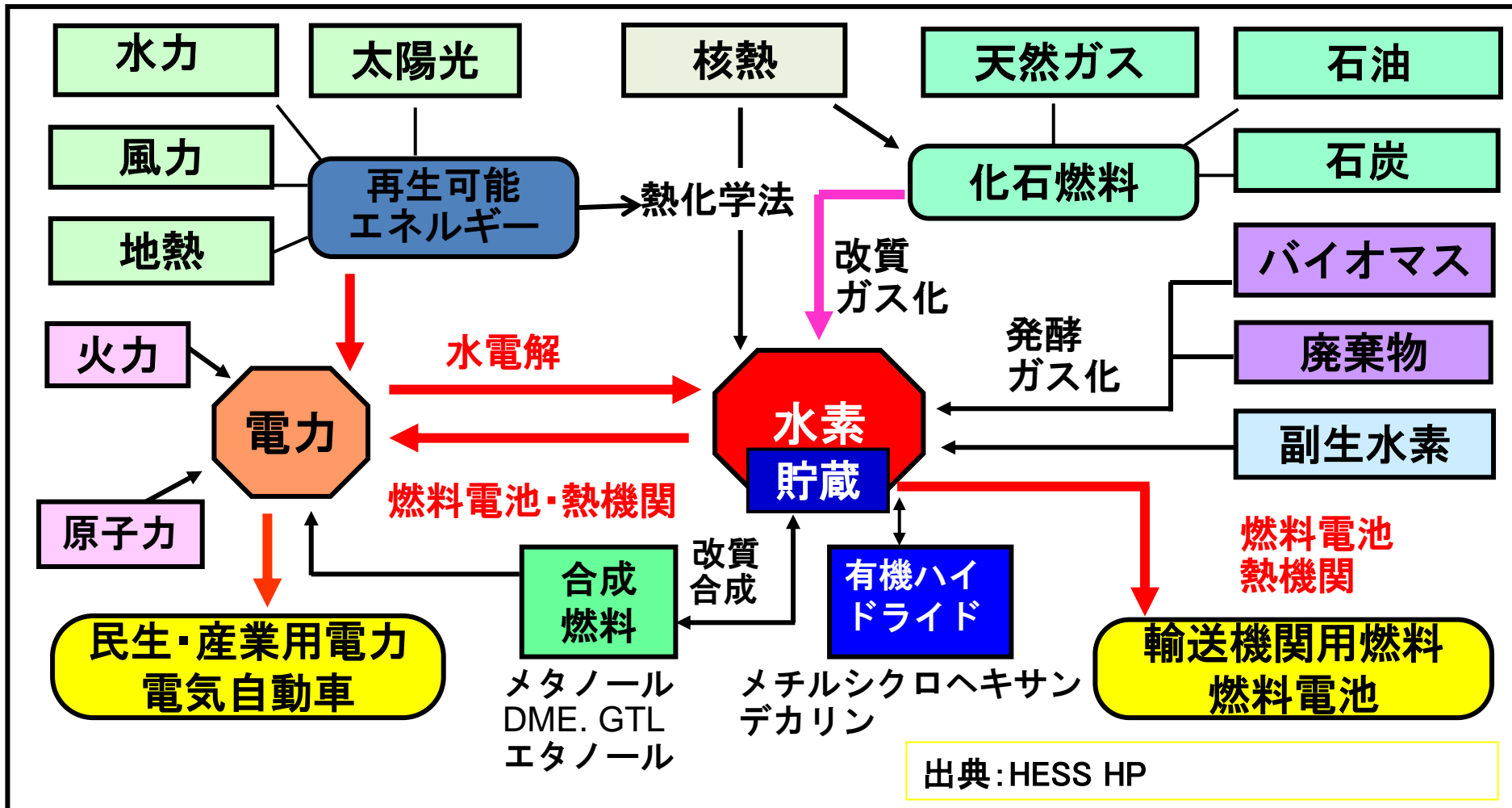
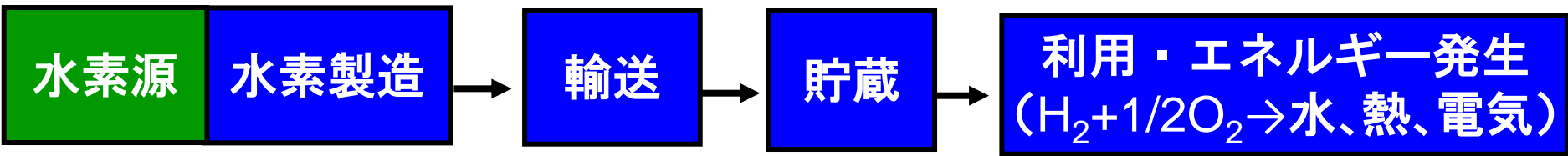
工業プロセス利用



水素還元製鉄

[出展] 各種資料より資源エネルギー庁作成

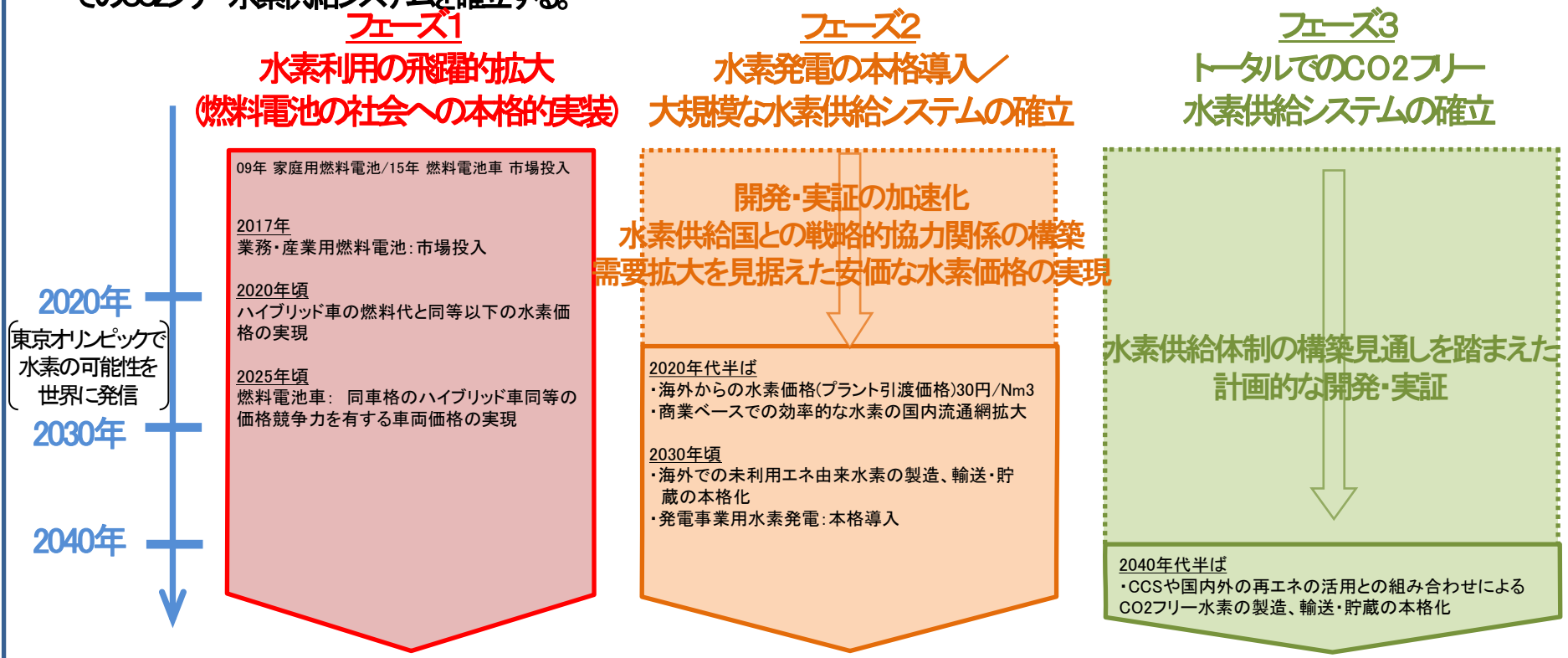
4. 水素エネルギーシステム



5. 水素社会実現に向けた対応の方向性

- 水素社会の実現に向けて、社会構造の変化を伴うような大規模な体制整備と長期の継続的な取組を実施。また、様々な局面で、水素の需要側と供給側の双方の事業者の立場の違いを乗り越えつつ、水素の活用に向けて産学官で協力して積極的取組んでいく。
- このため、下記のとおりステップ/ミステップで、水素社会の実現を目指す。

- ・**フェーズ1(水素利用の置役的拡大)**: 足元で実現しつつある、定置用燃料電池や燃料電池自動車の活用を大きく広げ、我が国が世界に先行する水素・燃料電池分野の世界市場を獲得する。
- ・**フェーズ2(水素発電の本格導入/大規模な水素供給システムの確立)**: 水素需要を更に拡大しつつ、水素源を未利用エネルギーに広げ、従来の「電気・熱」に水素を加えた新たな二次エネルギー構造を確立する。
- ・**フェーズ3(トータルでのCO2フリー水素供給システムの確立)**: 水素製造にCCSを組み合わせ、又は再エネ由来水素を活用し、トータルでのCO2フリー水素供給システムを確立する。



水素・燃料電池関連の機器・インフラ作業の市場規模(日本)
2030年 約1兆円 → 2050年 約8兆円

6.水素発電の意義②(水素利活用分野への波及効果)

- 水素発電の導入により、恒常的かつ大規模な水素需要が生じ、これに対応するための大規模なサプライチェーンが整備されることとなれば、原料水素コストが下がり、燃料電池自動車など、他の水素利活用分野においても波及効果が見込めるのではないかと。

水素需要量の比較(試算)

(※)一定の仮定を置いた場合の試算値

	年間水素使用量		備考
水素発電 (事業用100万Kw・専焼)	23.7億Nm ³	—	LNG火力発電の燃料を水素に換算して試算 ○出力:100万kW ○熱効率想定:51%(「コスト等検証委員会」より) ○稼働率想定:49%(「電力需給の概要」2010年度実績)
水素発電 (自家発10万Kw・専焼)	3.5億Nm ³ /基	6.8基	自家発(燃料種不定)の燃料を水素に熱量換算して試算 ○出力:10万kW ○熱効率想定:41%(「総合エネルギー統計」より) ○稼働率想定:58%(「電力調査統計」より) (※効率と稼働率は自家発平均)
燃料電池自動車	1,060Nm ³ /台	223万台	燃料電池自動車の試算前提 ○燃費:8.9km/Nm ³ (100km/kg-H ₂) ○年間走行距離:9,500km
燃料電池バス (路線バス)	52,000Nm ³ /台	4.5万台	燃料電池バスの試算前提 ○燃費:0.99km/Nm ³ (JHFCプロジェクトより) ○年間走行距離:51,684km (日本バス協会「日本のバス事業」をもとに推計)
家庭用 純水素形燃料電池 (0.7Kw)	2,260Nm ³ /台	105万台	家庭用純水素型燃料電池の試算前提 ○家庭用燃料電池の年間発電電力量:3,301kWh (「パナソニックHP」より推計) ○純水素形の発電効率想定:49% (家庭用燃料電池の発電効率39%(LHV)、改質器効率80%から算出)

各用途が同程度の水素需要

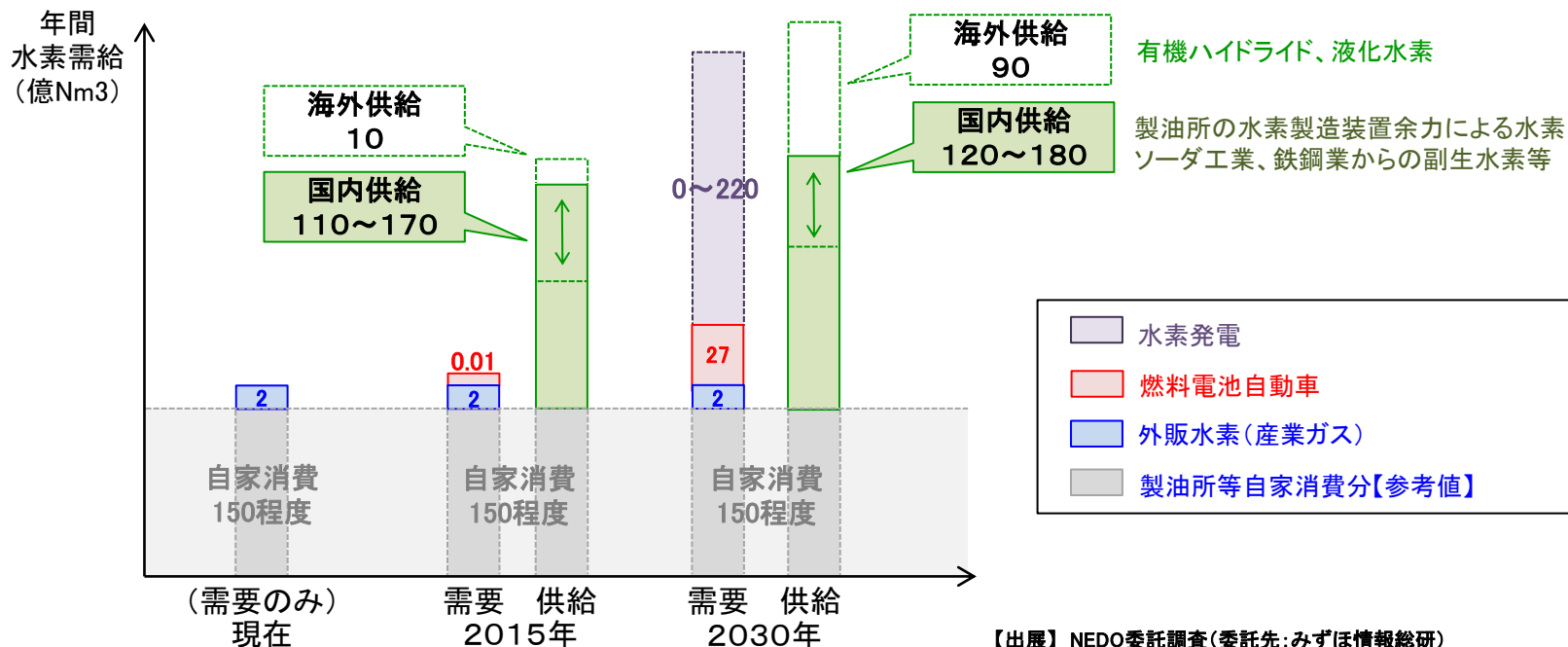
7.水素発電／未利用エネルギー由来水素輸送について②

(課題)水素の需要側と供給側のそれぞれの取組を一体的に行っていくことが重要(まずは、水素プラント引渡コスト30円/Nm3を下回ることが目安)

<対応の方向性(協議委員会の主な意見)>

- ①水素発電の本格導入に向けた具体的な取組計画
- ②水素発電に関する実証
- ③海外の未利用エネルギー由来水素輸送に関する実証

水素需給の将来見通し(試算の一例)



(注)上記前提は、本試算を行ったみずほ情報総研が行ったヒアリング調査結果等を踏まえたものであり、資源エネルギー庁の見解を示すものではない。

8. 2050年までの水素需要予測

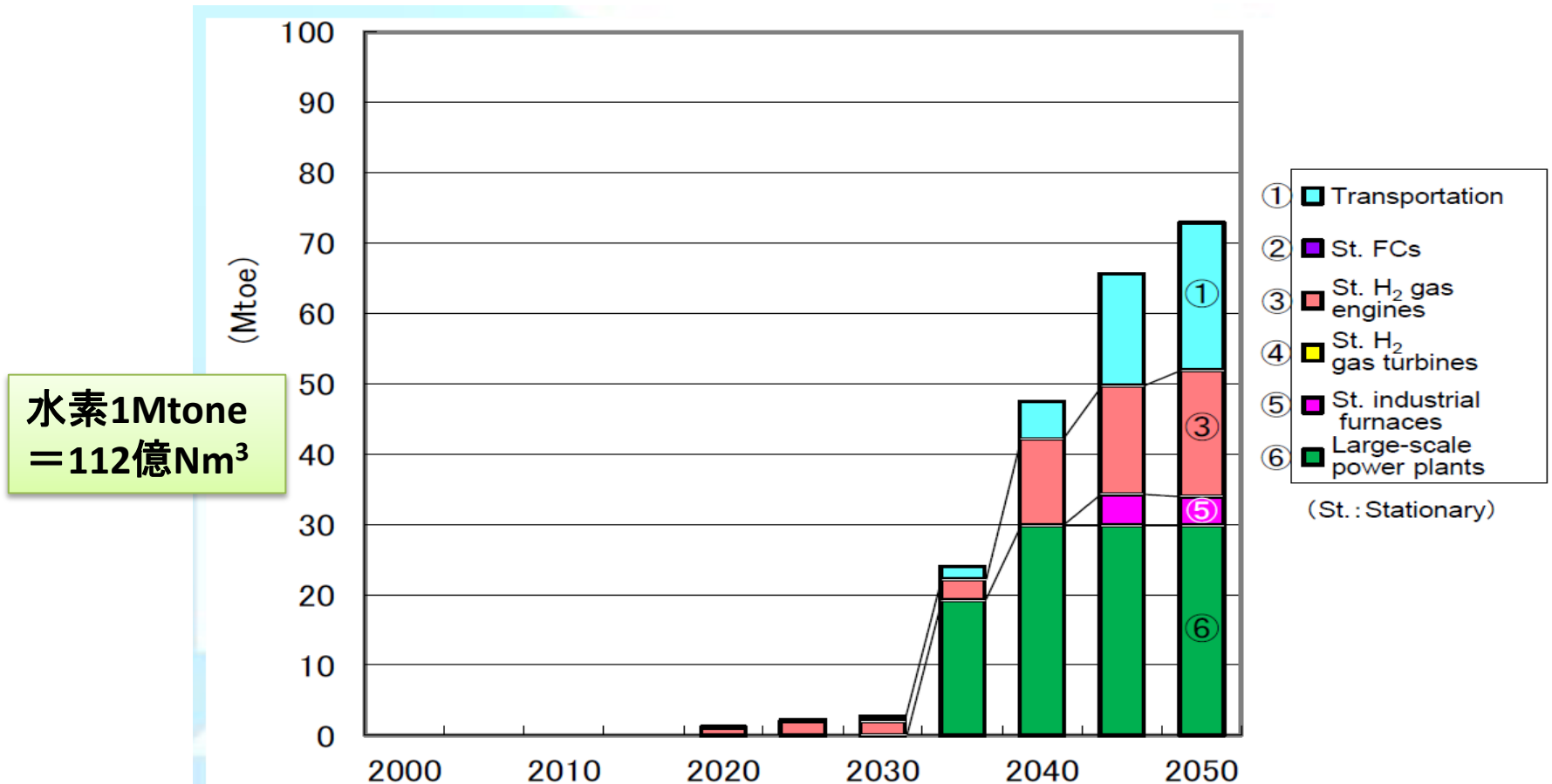


Figure 13 Hydrogen demand constitution in Japan
 (CCS is available in Japan and hydrogen CIF cost is about 30 Yen/Nm³ in 2050)

出典: Masaharu Sasakura a,*, Yuki Ishimoto b, Yoshihiro Aizawa c, KoSakata ,Research and Development Division, The Institute of Applied Energy, Japan Studies in Japan for Realizing CO₂-free Hydrogen Global Chains, Proceedings The 20th WHEC, Korea 2014, June

9.<水素の製造、輸送・貯蔵>

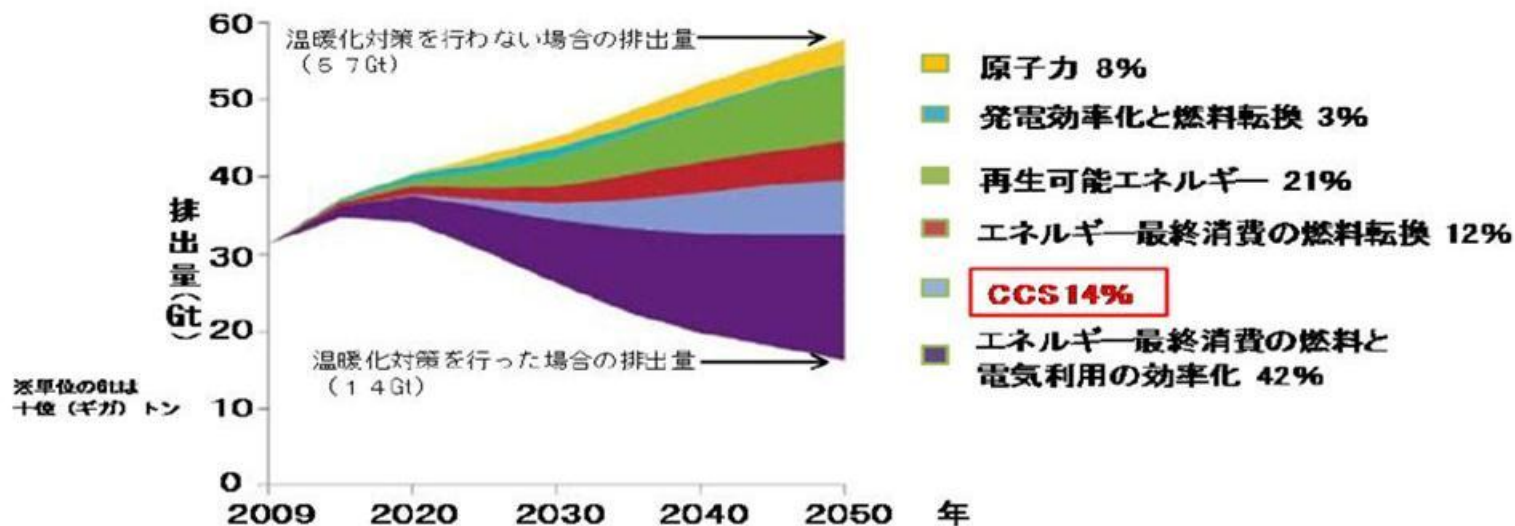
フェーズ3での課題

●課題1:水素供給国におけるCCS

海外の副生水素、原油随伴ガス、褐炭等の未利用エネルギーから製造された水素を国内に輸送する場合、地球大での二酸化炭素排出量削減を目指すためには、水素供給国において排出される二酸化炭素を回収・貯留するCCS等を行うことが必要である。

なお、全世界のCCSのCO₂削減ポテンシャルは約2兆トン（＝現在のCO₂排出量の約70年分相当）とされており【出展：IPCC「CCSに関する特別報告書」】、2050年までにCO₂を半減させる場合、CO₂排出削減量の14%はCCSにより達成されると評価されている【出展：IEA「エネルギー技術展望 2012」】。

図表 地球温暖化対策への各技術の貢献度



[出展] IEA「エネルギー技術展望 2012」

●課題2:再生可能エネルギー由来の水素製造等に関する技術開発・実証等

水電解による水素製造は、小規模な工業用として一定程度は行われてきているものの、水電解による大規模な水素製造はほとんど行われていない。このため、大規模で安定かつ安価に水素製造をできる技術開発が必要となる。また、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーは天候の変化等に伴い発電量が変動することから、出力変動に対応することも必要となる。

他方、上記の技術が実用化すれば、再生可能エネルギーの時間変動を水素に変換することで吸収することも可能となり、再生可能エネルギーの導入量拡大に資する可能性がある。ドイツを中心として、欧米各国でも再生可能エネルギー由来の電力を水素に変換する Power to Gas の取組が積極的に行われており、メタネーションなども含め、再生エネ由来水素を有効活用するための技術開発・実証を行っていくべきである。

●課題2:その他の中長期的な技術開発

CCSや再生可能エネルギー由来電気の活用に加え、現時点ではより基礎的な技術開発段階ではあるものの、将来的にCO₂フリー水素供給システムの実現に資する技術としては、光触媒による水素製造技術、高温ガス炉等の熱を活用したISプロセスによる水素製造技術、アンモニアの水素エネルギー・キャリアとしての活用などが検討されている。

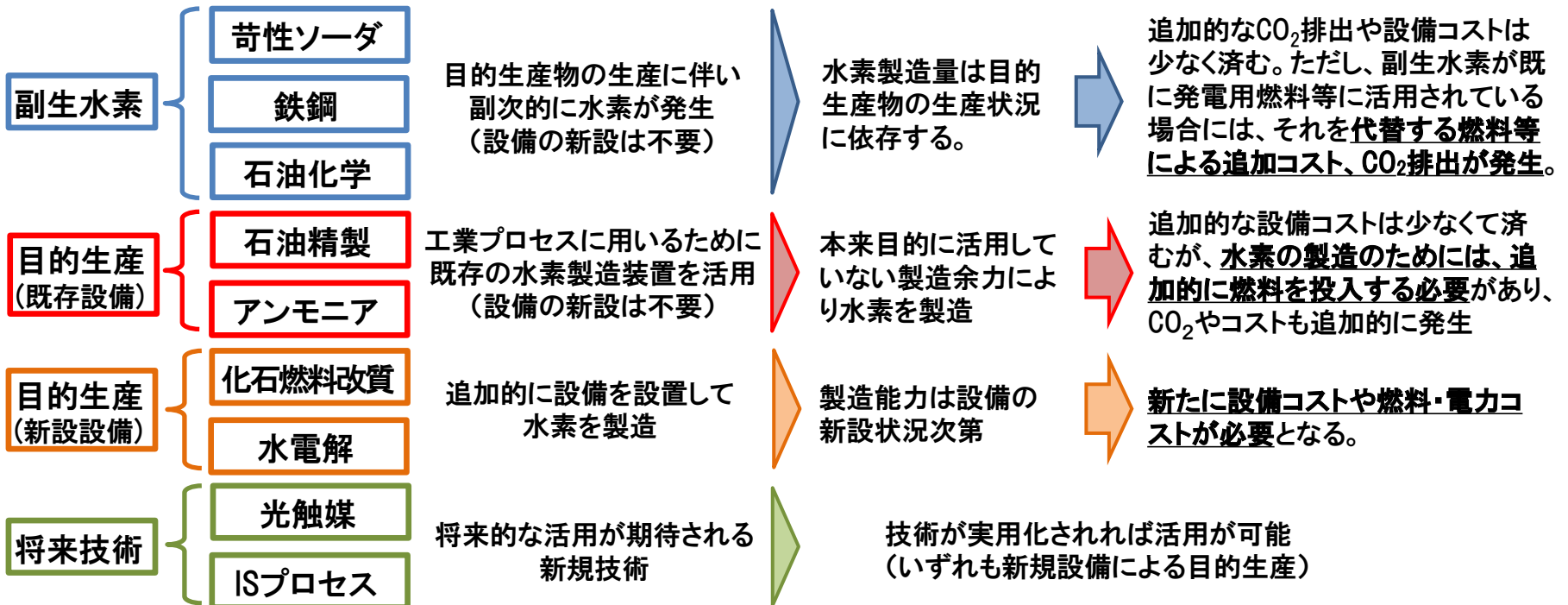
10. 水素の製造方法(まとめ①)

- 様々な水素の製造方法は、①副生水素、②既存設備による目的生産、③新規設備による目的生産、④将来技術に分類することが出来る。
- 追加的なコストは、①が最も低く、③が高い状況となるが、①の製造可能量は目的生産物の製造量によっても変わってくるため、簡単に融通できない可能性もある。

各水素製造方法に対する追加的な水素活用に向けた考え方

水素発生 の概要

追加活用に向けた考え方



出典:水素・燃料電池戦略協議会資料

11. 水素の製造方法(まとめ②):CO₂排出量)

- 水素の製造プロセスで生ずるCO₂排出については、再生可能エネルギーを用いた水分解を行った場合には非常に少ない。
- また、副生水素(苛性ソーダ、鉄鋼、石油化学)については、副次的に発生する点を踏まえると、CO₂の排出は非常に少ないと考えられるものの、既にこれらの副生水素がボイラー等の燃料として用いられている場合には、代替燃料として化石燃料を用いるケースが想定されるため、その分のCO₂が追加的に排出されることとなる。

各製造方法のCO₂排出量比較

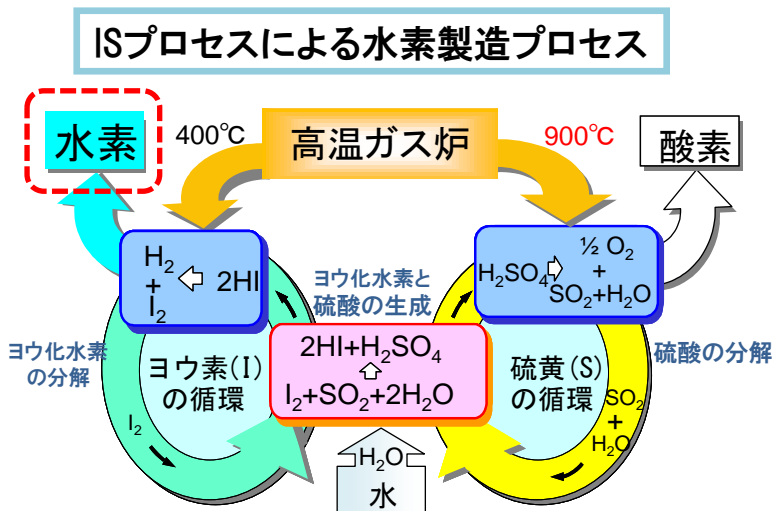
		CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /Nm ³ -H ₂)	備考
副生水素	苛性ソーダ	0.89~1.16 (重油代替~石炭代替)	
	鉄鋼	1.00~1.28 (重油代替~石炭代替)	・COGからの水素分離のためにPSAを想定 ・系統電力のCO ₂ 排出係数は2010年の0.35kgCO ₂ /kWhを想定
	石油化学	N.A.	
目的生産 (既存設備)	石油精製		・改質効率は70%を想定 ・改質後は水素精製にPSAを想定 ・系統電力のCO ₂ 排出係数は2010年の0.35kgCO ₂ /kWhを想定
	アンモニア	0.95, 1.08, 1.13 (都市ガス, LPG, ナフサ)	
目的生産 (新規設備)	化石燃料等改質		
	水電解	0.00~1.78 (再生可能エネルギー~系統電力)	・電解効率は70%を想定 ・系統電力のCO ₂ 排出係数は2010年の0.35kgCO ₂ /kWhを想定
将来技術	光触媒	製造段階では排出無し	
	ISプロセス	熱源のCO ₂ 排出量による	

12. 個別の水素製造技術⑧(将来技術 ii (ISプロセス))

- 水を熱により直接分解しようとするると4000°C以上の超高温が必要となるが、複数の化学反応を組み合わせ、1000°C以下の熱で水を分解することが可能となる。
- 例えば、ヨウ素(I)と硫黄(S)の化合物を用いたISプロセスでは、900°C程度の温度により水素の製造が可能となり、熱源としては、高温ガス炉の利用も検討されている。

ISプロセスによる水素

- ◆ ヨウ素と以降の化合物を用いて、複数の化学反応を組み合わせることで、900°Cの熱で水素の製造が可能



【出所】独立行政法人日本原子力研究開発機構

実用化状況

✓ 研究開発段階

環境性

✓ 熱源により異なる。高温ガス炉を用いればCO₂排出はほぼゼロとなる

安定性

✓ 安定供給が可能

経済性

✓ 熱源により、設備設置のコストが異なる

13. 水素の製造方法(まとめ③):経済性

各製造方法の経済性

		製造コスト (円/Nm3)	備考
副生水素	苛性ソーダ	20	・各種資料からの引用であり、詳細は不明
	鉄鋼	24~32	・各種資料から12~20円/Nm3 ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと石油産業の位置付けに関する調査報告書」、石油産業活性化センター、平成15年)では16.3円/Nm3であるが、最新のエネルギー価格に基づく28.1円/Nm3となり、上記の価格に比べ12円の上昇
	石油化学	20	・各種資料からの引用であり、詳細は不明。
目的生産 (既存設備)	石油精製	23~37	・各種資料から10~24円/Nm3 ・「水素社会における水素供給者のビジネスモデルと精油産業の位置付けに関する調査報告書」、石油産業活性化センター、平成15年)では11.1円/Nm3であるが、最新のエネルギー価格に基づく23.7円/Nm3となり、上記の価格に比べ13円の上昇。
	アンモニア	N.A.	
目的生産 (新規設備)	化石燃料等改質	31~58 (※)ランニングのみ	・改質器の設備費等は含まない。 ・改質効率を70%と想定。 ・都市ガス(工業・商業用)1.7円/MJ、A重油1.4円/MJ、LPG2.9円/MJ、ナフサ1.8円/MJ ・PSA用電力は0.33kWh/Nm3-H2。2012年の電力平均単価16.5円/kWh
	水電解	84(系統電力) 76~136 (風力~太陽光) (※)ランニングのみ	・電解装置の設備費等は含まない。 ・電解効率を70%と想定。 ・系統電力は2012年の伝よく平均単価16.5円/kWh ・調達価格算定委員会資料に基づき、風力発電は30万円/kWh、太陽光は10kW以上を29万円/kWh、10kW未満を38.5万円/kWhとし、コスト等検証委員会の手法により発電単価を推計すると、各々14.9円/kWh、23.6円/kWh、26.8円/kWh ・水素製造は発電サイトでの電解を想定していることから、送電コストは含まない。

(※) 過去の各種調査より抜粋しており、必ずしも同じ前提にしたがって計算されたものではない。

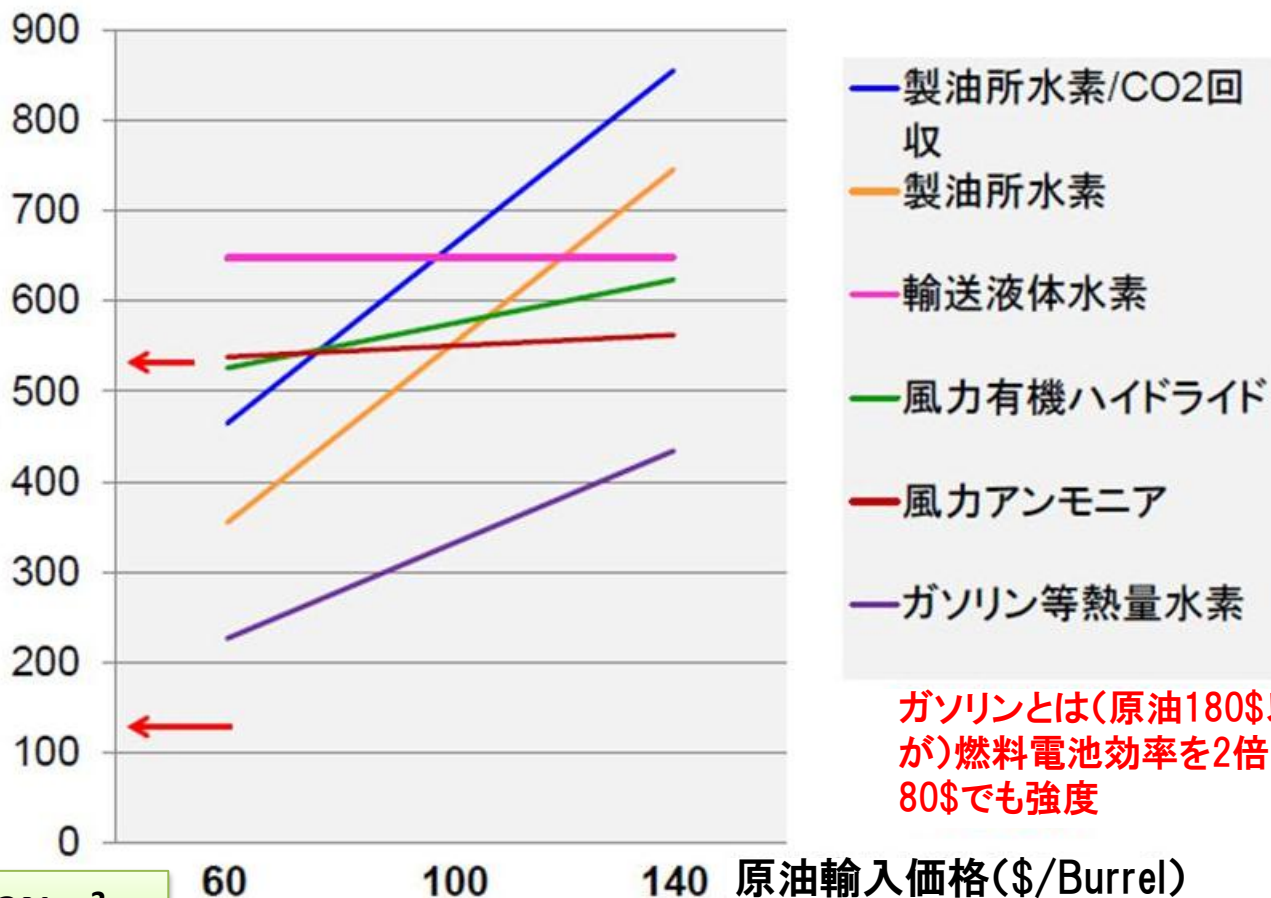
また、電力料金、化石燃料価格等の上昇等に伴い、現在、コストが高くなっているものもあると想定される

14. 水素価格予測

水素価格(¥ / kg H₂)

¥3/kWh 風力発電 > 水素 > NH₃などを輸入し、日本で分解した水素価格は原油100\$以上で競合できる

可能性



ガソリンとは(原油180\$以上で優位だが)燃料電池効率を2倍とすると原油80\$でも強度

水素1kg = 11.2Nm³

村田、燃料電池、10(4),27(2011)を再計算(¥3/kWh風力水素であれば、現行技術で実現)

出典: 秋鹿研一「再生可能エネルギー社会への鍵: エネルギーキャリア(プロジェクトの背景と内容)」
平成25年11月20日記者会見資料

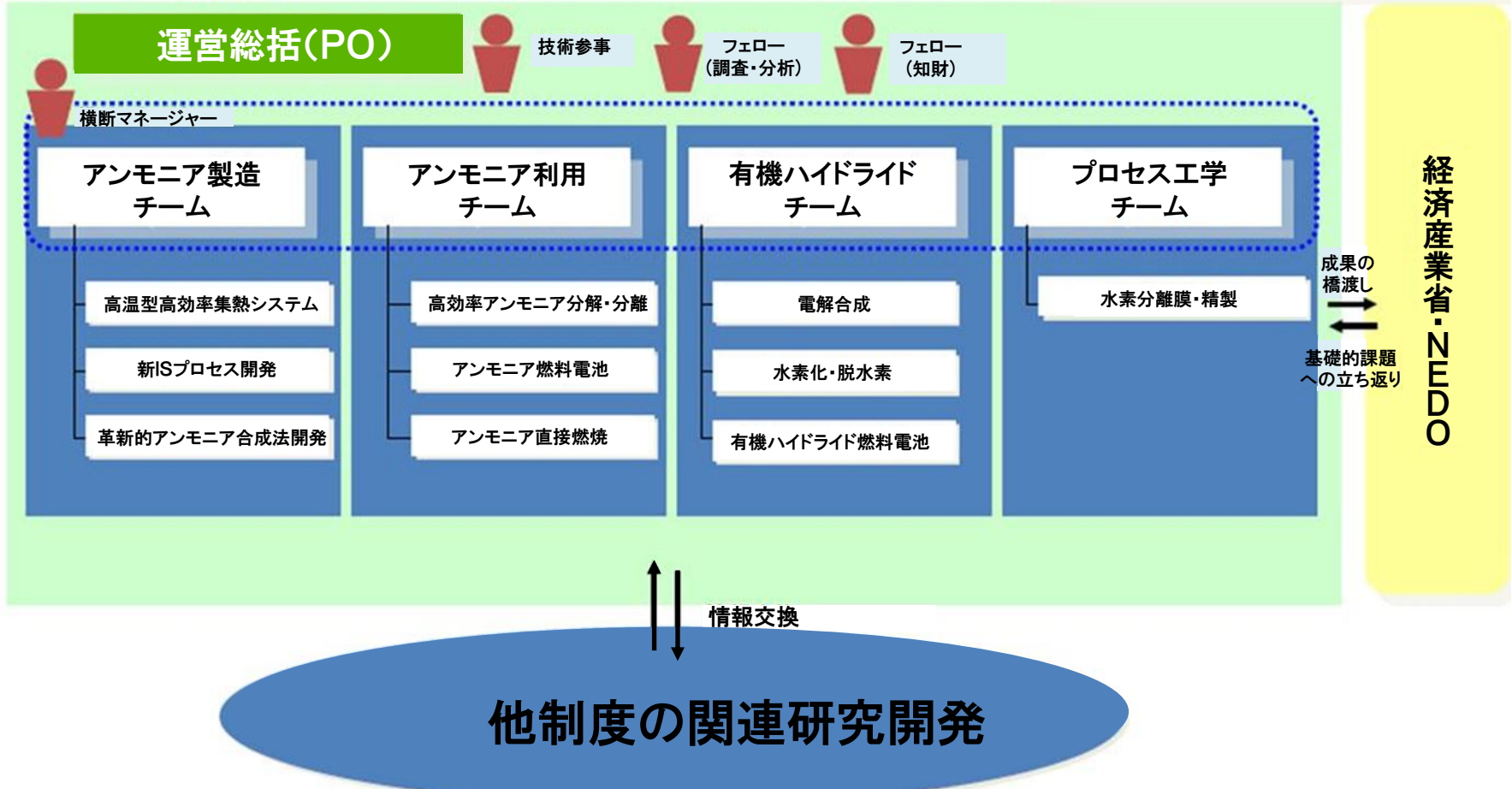
15. エネルギーキャリア運営体制

ガバニングボード

- 文部科学省・経済産業省 ●学識経験者
- 経済団体 ●関連企業 ●NEDO, JST

文部科学省(JST-ALCA特別重点テーマ)

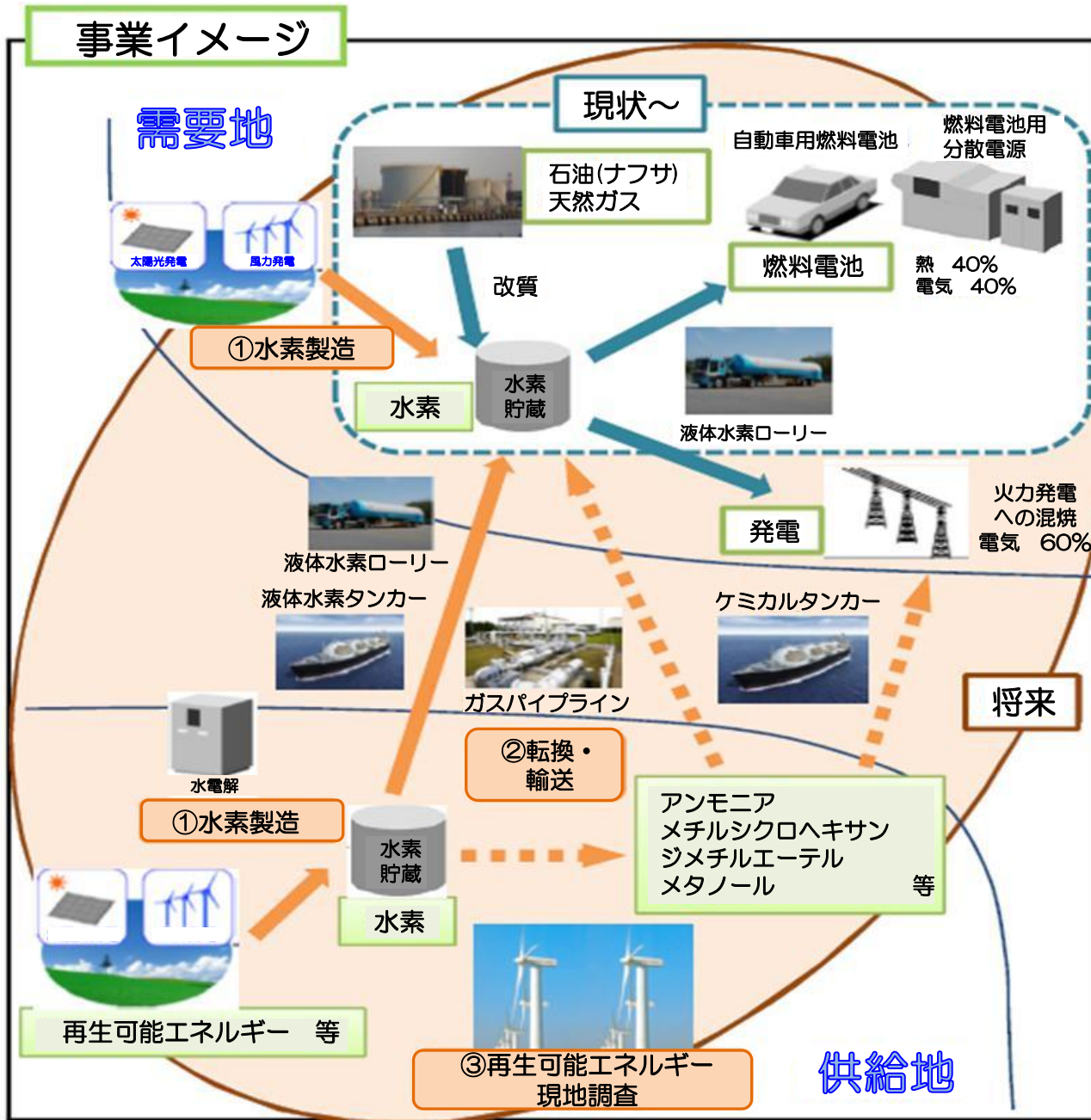
トータルシステムシナリオ検討



出典:文部科学省HPから

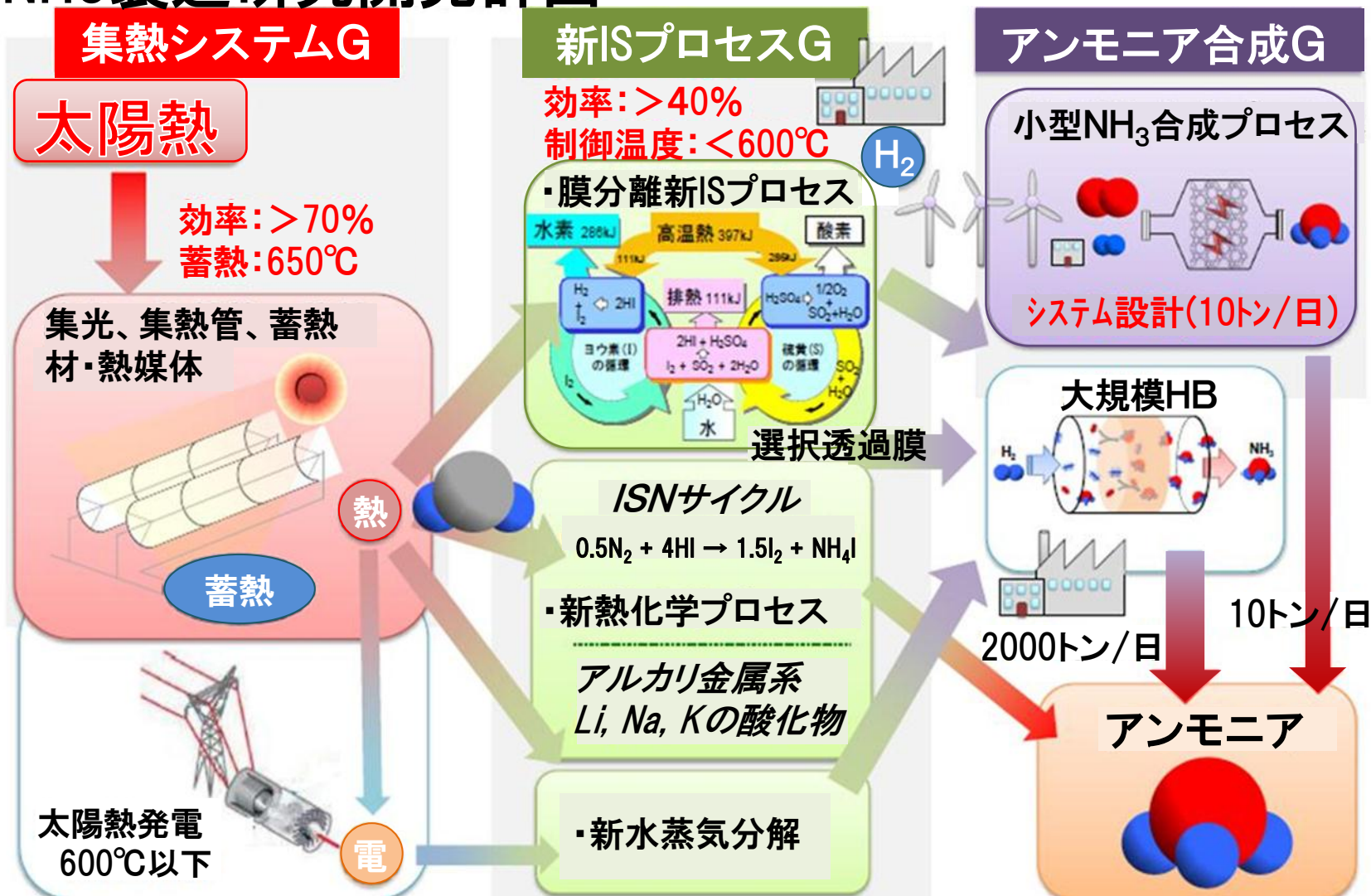
16.

事業イメージ



17. NH3製造研究開発計画

(広島大小島資料より)



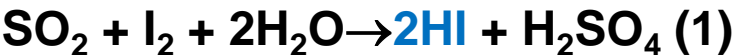
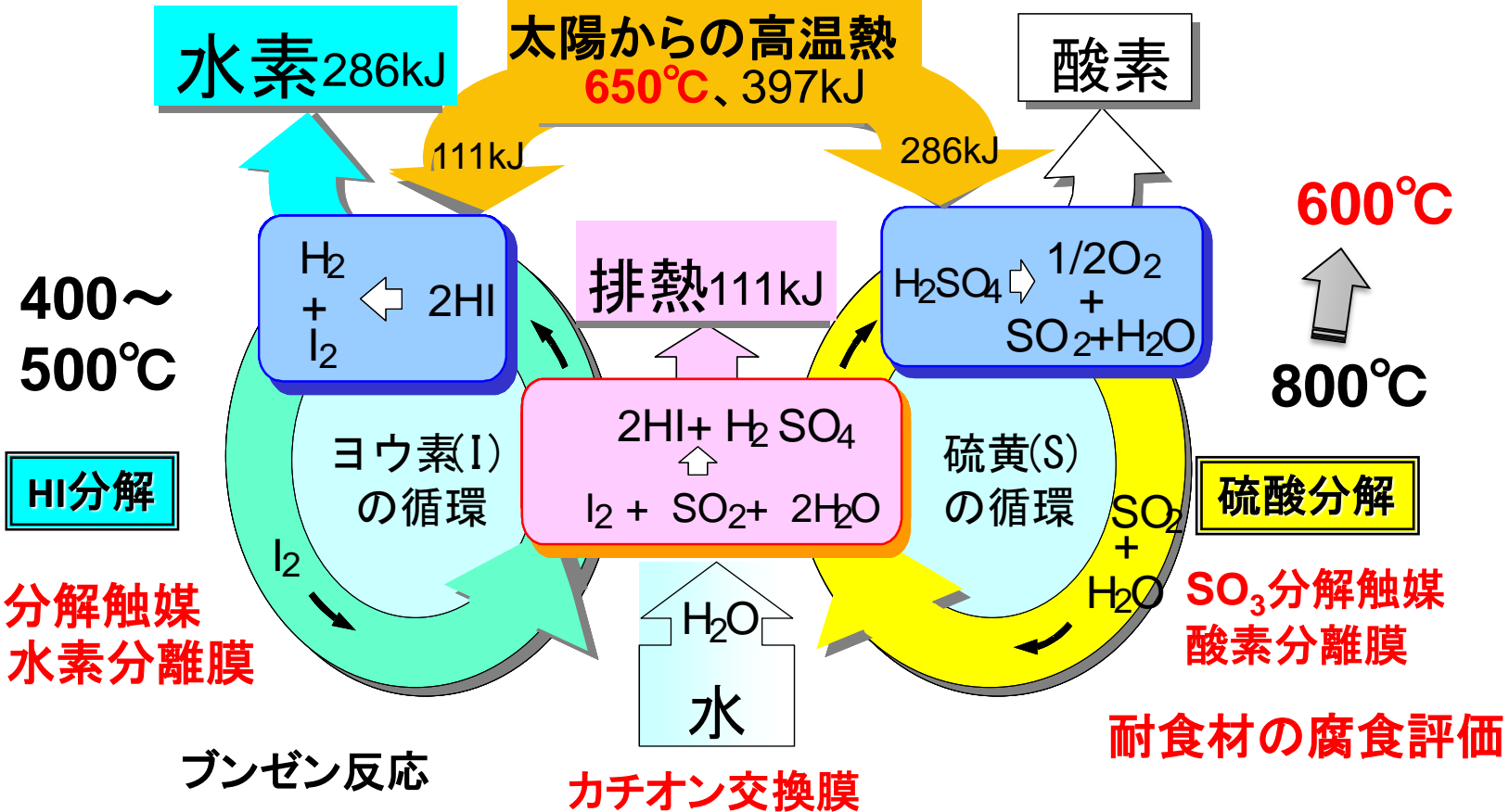
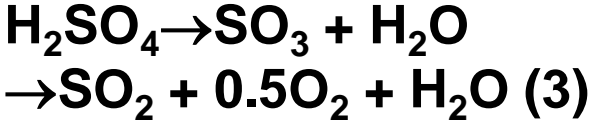
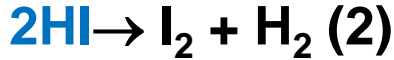
出典: 秋鹿研一「再生可能エネルギー社会への鍵: エネルギーキャリア(プロジェクトの背景と内容)」
平成25年11月20日記者会見資料

18.新ISプロセスの開発

出典：小島由継、平成25年度ALCA研究開発課題申請書から作成

目標：600 °C以下、40%以上の水素製造効率（水電解水素効率：30%）

現状：ISプロセスにより、高温ガス炉からの約800 °Cの熱で水素製造



19.農工大の研究戦略

TUATハイブリッドサイクル

TUAT熱化学ISNサイクル

太陽光発電



太陽
エネルギー



太陽熱集熱
650°C

空気

N₂

H₂O

水

農業用のアンモニア水製造
100kg/日の小型プラント

アンモニア

海外からのエネルギーキャ
リアー用アンモニア製造
100トン/日の大型プラント



21. 期待される新ISN熱化学プロセスの熱効率

ISサイクルのエネルギー変換効率

53.5%～76.6% (出典: JAERIResearch2002-039)

ISNサイクルのエネルギー変換効率を40%から60%に変化させた場合のアンモニア製造のエネルギー原単位

熱効率 エネ原単位

40% 63MJ/kg

50% 53 MJ/kg

60% 42 MJ/kg

参考:

天然ガスからの水素によるハーバー・ボッシュ法

約 30 MJ/kg

電解水素を用いたハーバーボッシュ法

約 45 MJ/kg

今後、ISN熱化学サイクルからのアンモニアとハーバボッシュ法からのアンモニアの製造コストを入手するエネルギー価格から評価することが課題である。

22. ハイブリッド熱化学サイクルを用いたアンモニア合成

Table.1 アンモニア合成TUATハイブリッドサイクルMARK II

番号	反応式	ΔH [kJ/mol]	ΔG [kJ/mol]	T [°C]
2-1	プラズマ反応 $1.5\text{CO}_2 \rightarrow 1.5\text{CO} + 0.75\text{O}_2$	424.5	385.8	25
2-2	熱化学触媒反応 $0.5\text{N}_2 + 1.5\text{CO} + 1.5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + 1.5\text{CO}_2$	-107.7	-59.3	25
全体	$0.5\text{N}_2 + 1.5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.75\text{O}_2 + \text{NH}_3$	316.8	326.5	25



CO生成にのみプラズマを用いて窒素と水とCOからアンモニアを合成する

各反応の進行は実験で検証済み

平成26年度 基盤研究(B)(特設分野研究)で申請中
高温ガス炉の発電電力を使用することも可能

Fig.12 ハイブリッドサイクル概略図

23. 日本が高温ガス炉技術で世界のトップランナーであることの意義

- ① 唯一の被爆国であり、東日本大震災により生じた原子炉事故を教訓に、世界一安全性を重視する日本が提案する安全基準を国際標準にして、国際的に原子力利用の安全性を監視し、技術的な支援ができる体制を保持することが、高温ガス炉を受け入れるパブリックアクセプトランスを形成する上で重要である。
(安全性確保)
- ② 再生可能エネルギーだけでは日本のエネルギー需要を賄えきれない場合、安全性が理解されて高温ガス炉からのエネルギー供給を社会が求めるようになった時、高温ガス炉の製造技術を保有し、それを提供できる産業と技術者が存在することが高温ガス炉を選択する上で重要である。(技術確保)
- ③ 日本の高温ガス炉の技術(再処理技術も含めて)をASEAN諸国に提供することで、それにより生まれるエネルギーを優先的に日本に輸入できる。(エネルギーセキュリティー)
- ④ 高温ガス炉の熱利用技術を開発しておくことで、受け入れ国が必要とするエネルギーと食料と環境に関する課題を解決するシステムを提供でき、国際的に貢献できる。(利用の多様性)
- ⑤ 高温ガス炉からの水素が30円/m³程度の価格で提供できることが水素社会に高温ガス炉が参入する上で重要な目標である。(経済性)