

水素技術で エネルギーの高度利活用を 目指す

・～ これからが本番、カーボンニュートラル社会構築 ～

ひょうご水素社会推進シンポジウム

日時:令和5年 1月23日(月)14:00

会場:アクリエひめじ

駒井 啓一

神戸大学 客員教授 工学博士

産官学連携本部 オープンイノベーション機構

海事・エネルギー分野担当クリエイティブマネージャ

本日の話題

はじめに

神戸大学 水素技術勉強会のご紹介

1.エネルギーが足りない

今、最大の課題はエネルギーの確保

2.実はエネルギーは莫大

エネルギーを良く知り、賢く使おう

3.エネルギー高度利活用

水素と言うエネルギーキャリア

4.いよいよ始まった水素社会構築

水素社会の先進地「兵庫・神戸・姫路」

5.これからが本番、カーボンニュートラル社会構築

「兵庫・神戸・姫路」から日本全国へ、そして全世界へ貢献

はじめに 神戸大学 水素技術勉強会～再エネ高度利活用を目指して～

【水素技術】1968年のカスケード式He液化機完成等をルーツに極低温、超伝導に関わる多くの研究実績。2004年のLH₂超伝導液面計基礎研究等を皮切りに液体水素分野の基礎研究を展開。国内の大学では唯一学内に水素専用実験棟を有し、特色ある液体水素研究等を実施中（水素技術勉強会主査：武田実教授）

【再エネ技術】気象学を基盤に2015-17年に洋上風況マップ作成NEDO事業を主導、NeoWinsを開発・公開、国内の洋上風力開発に欠かせないツールを完成。高精度風況調査手法の確立、国内洋上風力発電拡大の技術インフラとしての試験サイト構築検討等を実施中（水素技術勉強会主査代理：大澤輝夫教授）

本学
先端融合研究環
プロジェクト

2014～18年度「海洋再生可能エネルギーと水素エネルギーへの展開」

2019～21年度「海洋再生可能エネルギーによる水素製造システムの研究開発」

2019～24年度

文部科学省
オープンイノベーション
整備事業 拠点校

本学オープンイノベーション
重点4分野のひとつ
海事・エネルギー

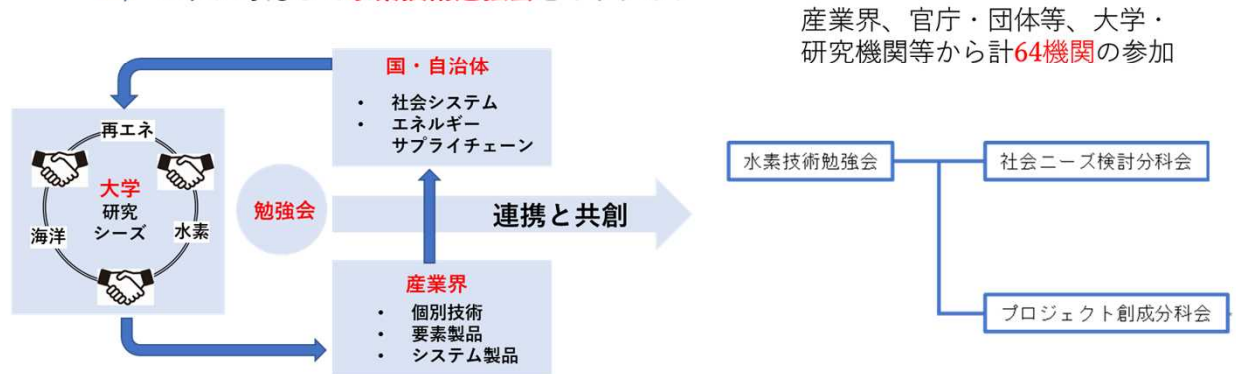
産官学の連携・共創の場として「水素技術勉強会」を発足させた

講師 自己紹介
 1971 東京大学工学部卒
 1973 同上修士課程修了⇒川崎重工業株式会社
 1996 工学博士（東京大学）
 2003 （財）省エネルギーセンター
 2013 川崎重工業株式会社
 2019 神戸大学
 永年エネルギー分野の研究、開発、エンジニアリング、技術企画、省エネ制度設計・国際規格等に従事。2013年より川崎重工にて水素サプライチェーン調査業務を経て、神戸大学にて海事・エネルギー分野オープン・イノベーション推進、水素技術勉強会立ち上げの企画、運営に従事

2022年3月 キックオフシンポジウム開催
 2022年6月 勉強会発足、社会ニーズ検討分科会活動開始 ～12月までに計4回開催

- ・ 開拓プロジェクトの全て要素研究項目（海洋、再エネ、水素）の重点を包含
- ・ その実現に向けた社会全体の動きが急加速

これに呼応して水素技術勉強会をキックオフ



1. エネルギーが足りない

今、最大の課題はエネルギーの確保



Energy Security (自給率)

東日本大震災前(約20%)を更に上回る
概ね25%程度を2030年度に実現(現在11.8%)

Economic Efficiency (電力コスト)

現状よりも引き下げる
(2013年度 9.7兆円 ⇒ 2030年度 9.2~9.5兆円)

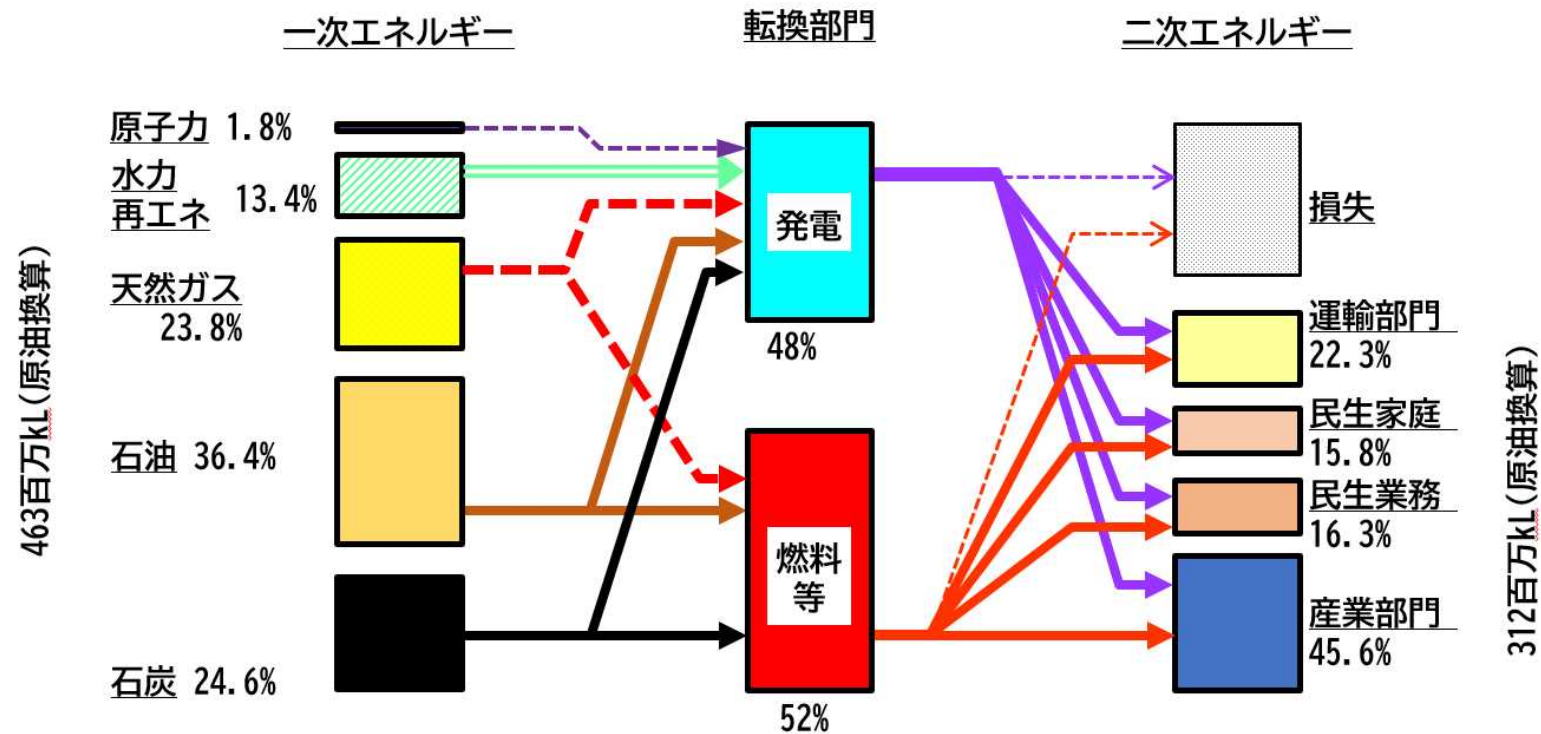
※エネルギーミックス策定時

Environment (温室効果ガス排出量)

欧米に遜色ない温室効果ガス削減目標を実現
(2030年度に2013年度比▲26%)

一次エネルギーにも着目

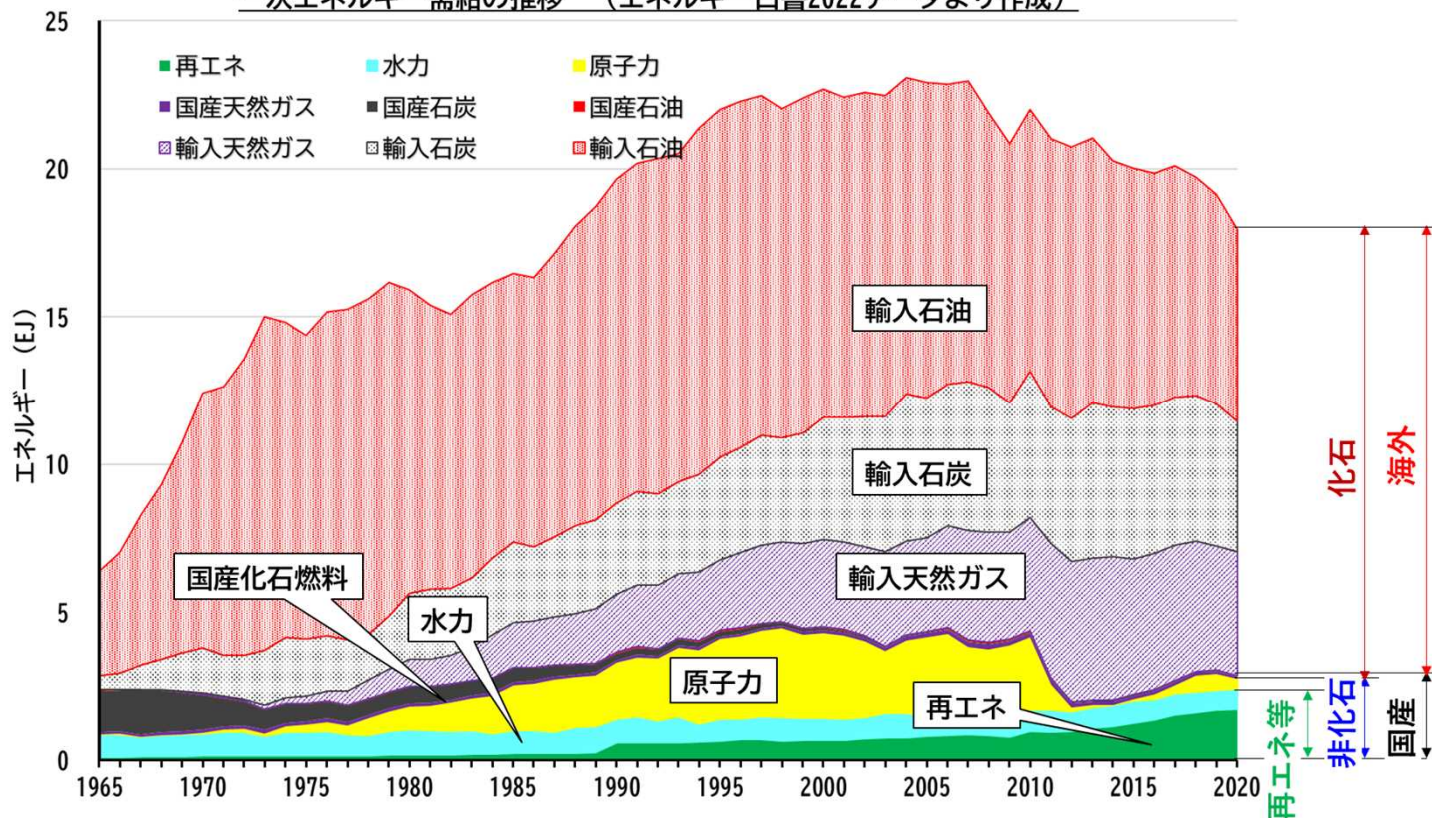
- 多くの場合、エネルギーとは電気や燃料等の二次エネルギー。
- だが、時にはコンセントの裏側、一次エネルギーにも着目しよう。
- 3E+Sは、一次エネルギーなしには語ることはできない。



「エネルギー白書2022」データにより計算

我が国はエネルギーの9割前後を海外からの輸入に依存

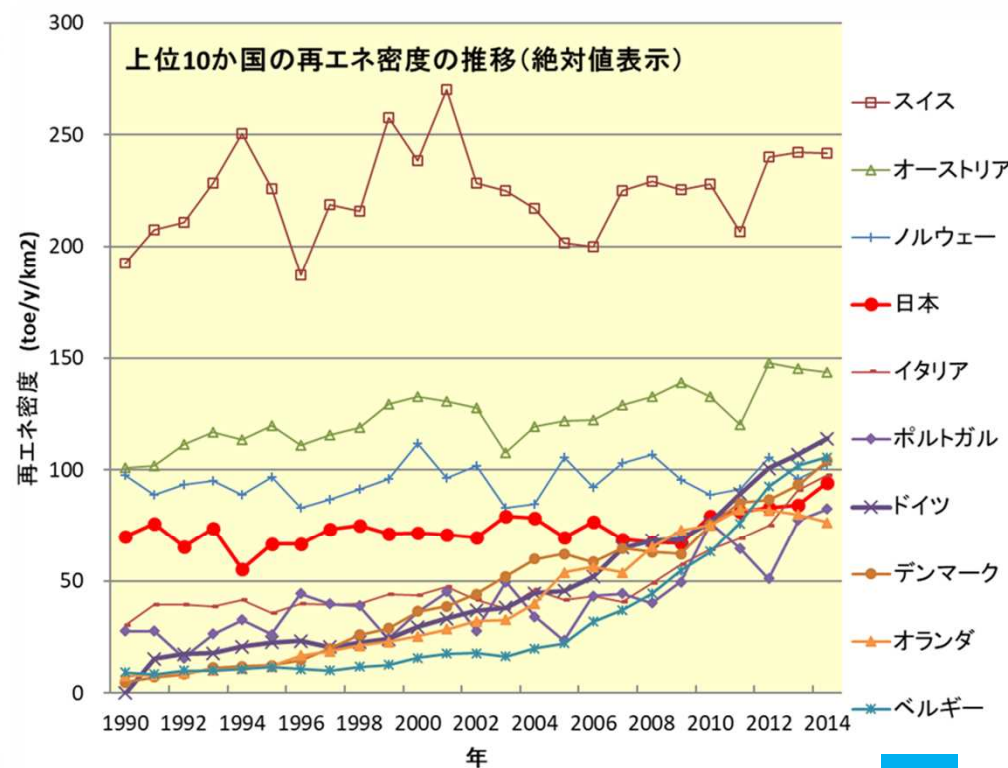
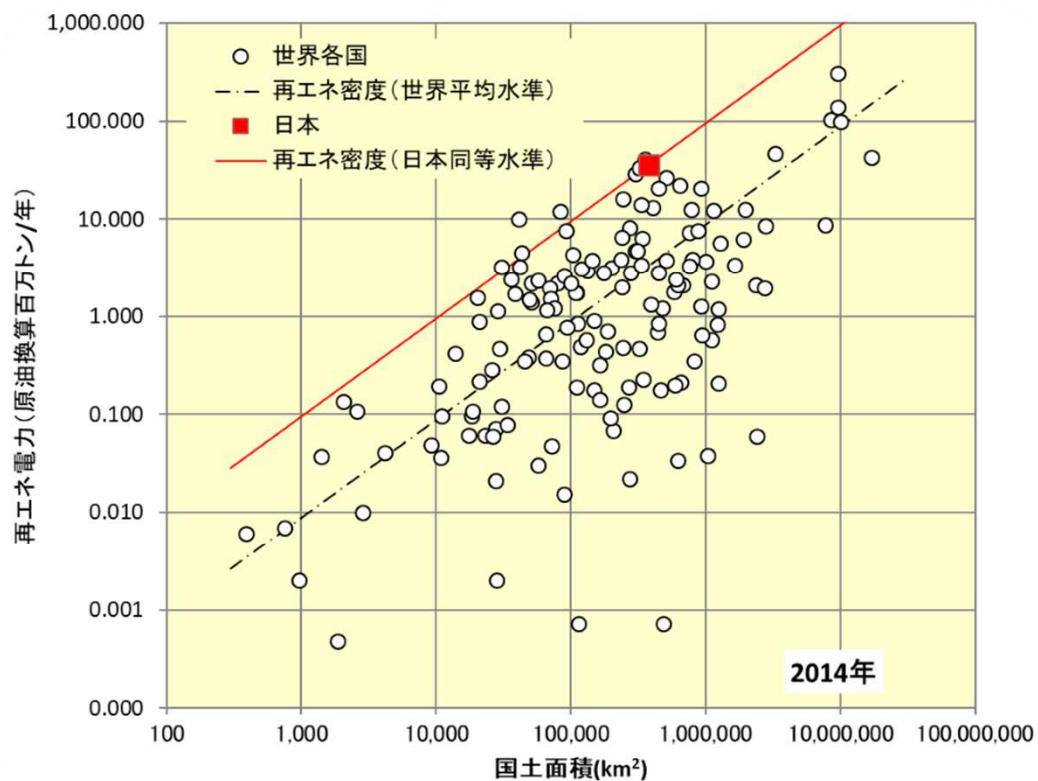
一次エネルギー需給の推移 (エネルギー白書2022データより作成)



- 原子力を含めても自給率は約15%。一次エネルギーの85%を輸入に依存。
- 日本は島国。輸入出来るエネルギーは化石燃料に限られる。再エネの輸入は容易ではない。
- 国産エネルギーは、ほとんど全てが再エネ。実は、日本は世界トップクラスの再エネ大国
- 単純な再エネ自給自足だけでは、もはや限界。知恵の絞りどころ(イノベーションが必要)

実は日本は再エネ大国

- 国土面積当たりの再エネ発電量（再エネ密度）は世界平均の約10倍。世界トップクラス。
- 近年、欧州諸国の再エネ開発が急拡大してはいるが、日本が大きく後れをとっているということではない。
- 日本の化石燃料依存度が高いのは島国だから。再エネは輸入できない。再エネは既に飽和状態。

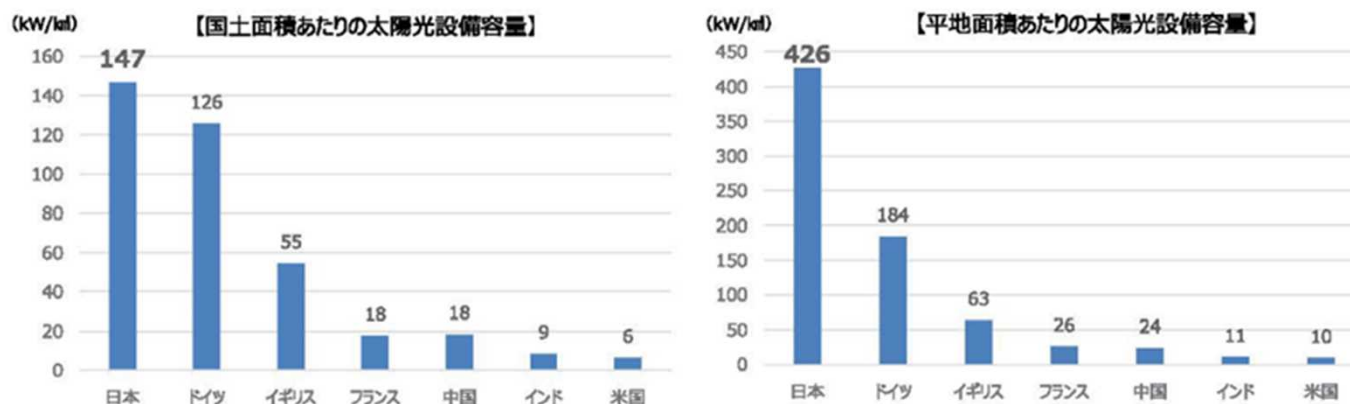


EIAデータより作成

例えばPV(太陽光発電)も主要国でトップクラス

例えば太陽光発電は。

国土面積当たりの太陽光導入容量は主要国の中で最大。平地面積で見るとドイツの2倍



	日	独	英	仏	中	印	米
国土面積	38万km ²	36万km ²	24万km ²	54万km ²	960万km ²	329万km ²	963万km ²
平地面積※ (国土面積に占める割合)	13万km ² (34%)	25万km ² (69%)	21万km ² (88%)	37万km ² (69%)	740万km ² (77%)	257万km ² (78%)	653万km ² (68%)
太陽光の設備容量 (GW)	56	45	13	10	175	28	63
太陽光の発電量 (億kWh)	690	462	129	102	1,969	361	872
発電量 (億kWh)	10,277	6,370	3,309	5,766	71,855	15,832	44,339
太陽光の総発電量 に占める比率	6.7%	7.3%	3.9%	1.8%	2.7%	2.3%	2.0%

(出典) 外務省HP (<https://www.mofa.go.jp/mofaj/area/index.html>)、Global Forest Resources Assessment 2020 (<http://www.fao.org/3/ca9825en/CA9825EN.pdf>)
 IEA Market Report Series - Renewables 2019 (各国2018年度時点の発電量)、総合エネルギー統計(2019年度速報値)、FIT認定量等より作成
 ※平地面積は、国土面積から、Global Forest Resources Assessment 2020の森林面積を差し引いて計算したもの。

なぜ、日本の再エネ割合が低いのか？

再エネ割合：一次エネルギー消費量全量に占める再エネの割合

- 再エネ密度は世界トップクラス
- エネルギー効率（省エネの進展度）も世界トップクラス
 - エネルギー効率：GDP当たりの一次エネルギー消費量。原単位とも言う。小さいほど高効率。
- それでも再エネ割合が低いのは、人口密度が高いから
 - 人口密度：国土面積当たりの人口。
- 単純な再エネ割合の向上は、経済レベルの低下となる
 - 経済レベル：国民一人当たりのGDP(国内総生産)。大きいほど経済レベルが高い。

$$[\text{再エネ割合}] = \frac{[\text{再エネ密度}]}{[\text{エネルギー効率}] \times [\text{経済レベル}] \times [\text{人口密度}]}$$

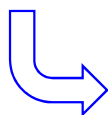
$$\left[\frac{\text{再エネ}}{\text{エネルギー}} \right] = \frac{\left[\frac{\text{再エネ}}{\text{国土面積}} \right]}{\left[\frac{\text{エネルギー}}{\text{GDP}} \right] \times \left[\frac{\text{GDP}}{\text{人口}} \right] \times \left[\frac{\text{人口}}{\text{国土面積}} \right]}$$

再エネの利活用は重要。しかし安易に考えることはできない！

- 地球温暖化、気象異常はますます深刻化
- カーボンニュートラルは必須
- 化石燃料依存からの脱却のため、再エネ（再生可能エネルギー）の利活用はもちろん重要！



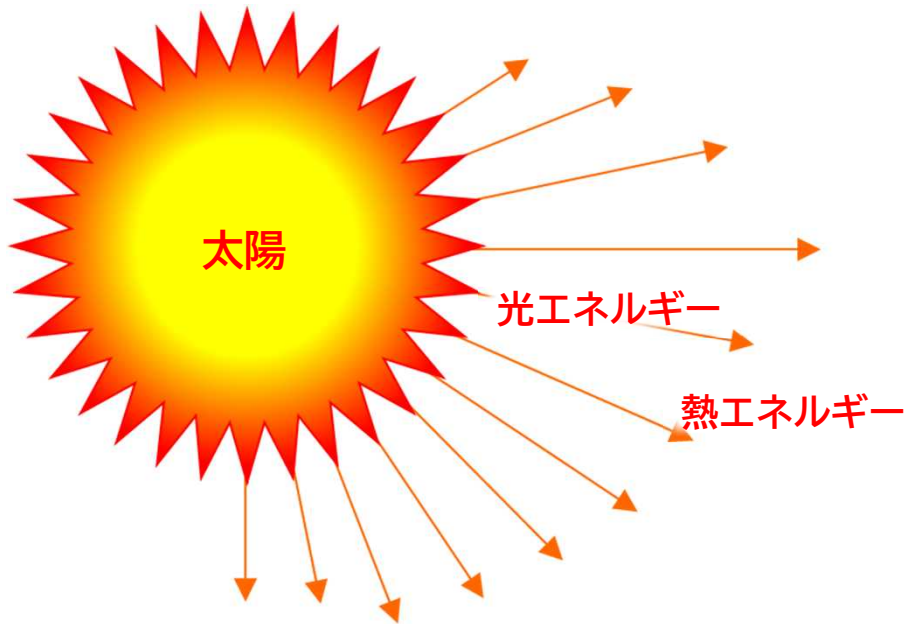
- だが日本の再エネ利活用は、実は世界でもトップクラス
- それでも日本の再エネは足りない
- 再エネは輸入できない。日本のエネルギーが足りない



- 再エネの利活用は、余り無理は出来ない
- 無理な再エネの利活用で、自然環境に悪影響をもたらしてはならない
- 私たちの住環境を壊してはならない

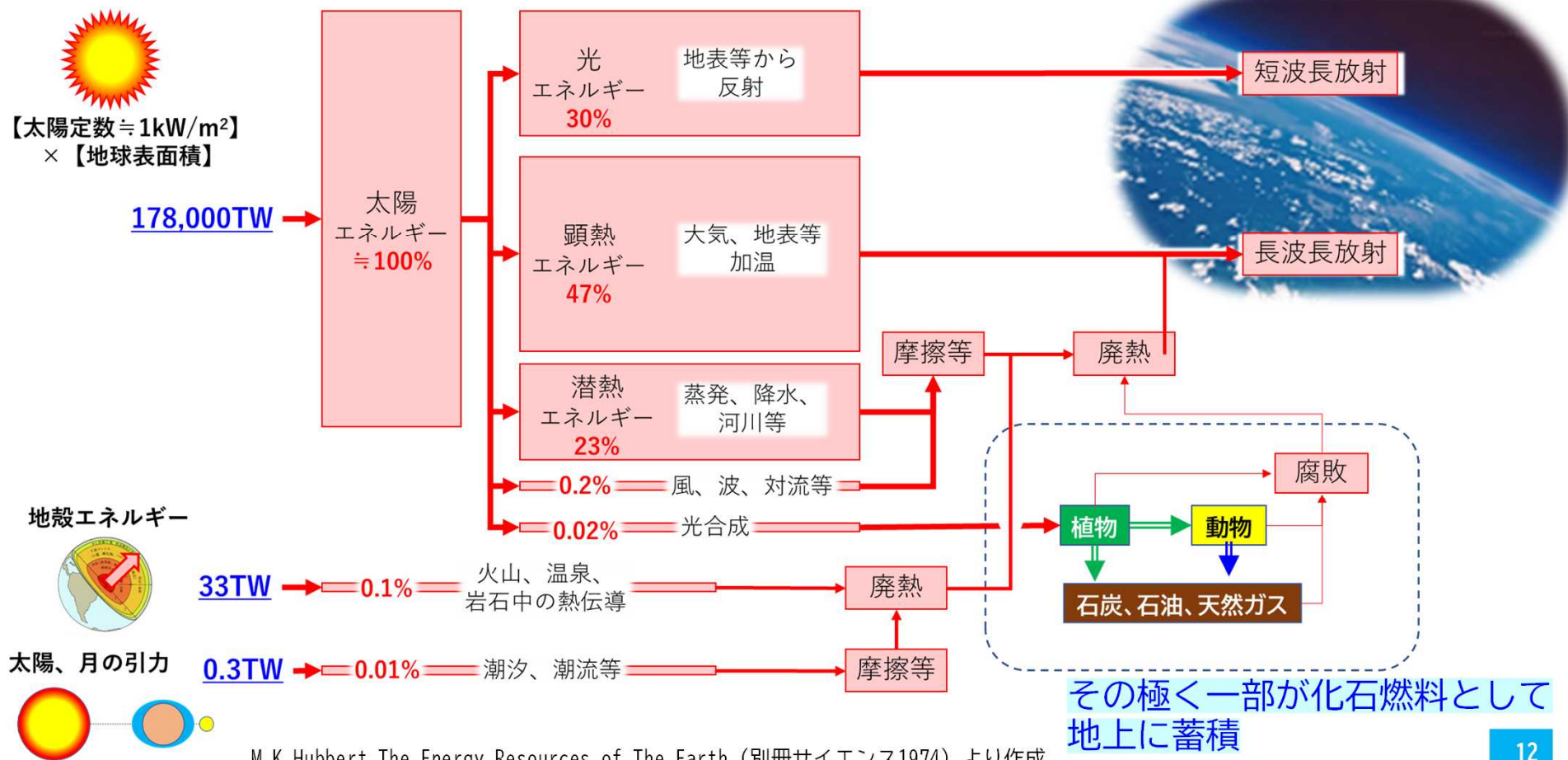
2. 実はエネルギーは莫大

エネルギーを良く知り、賢く使おう



ほぼ全ての地上のエネルギーは太陽から

そして、それは再び大宇宙へ

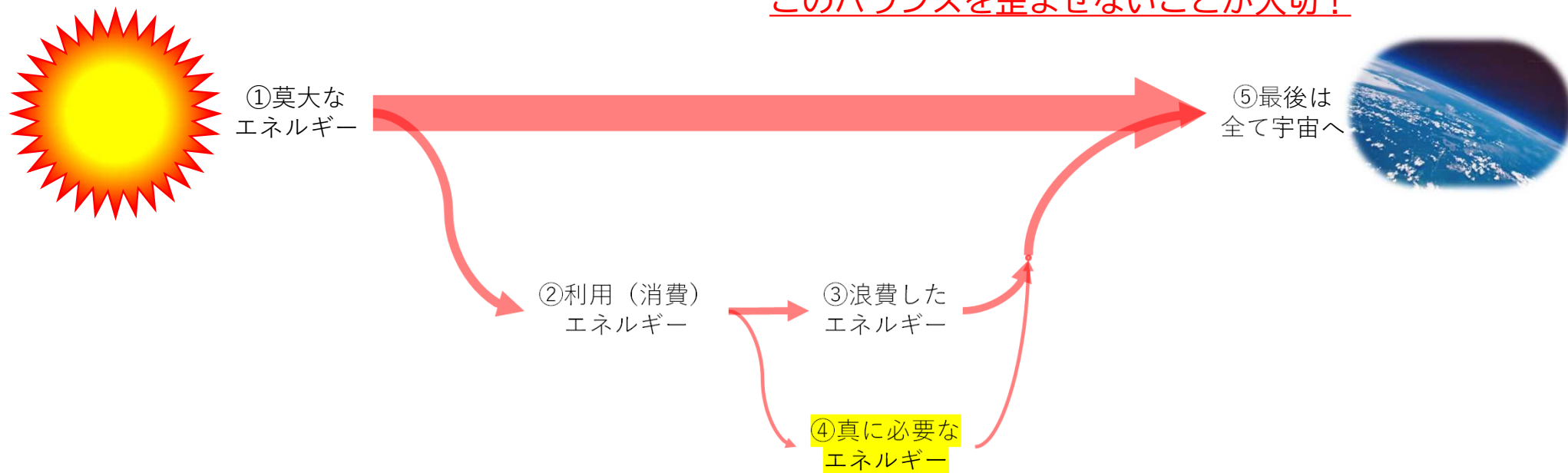


M. K. Hubbert, The Energy Resources of The Earth (別冊サイエンス1974) より作成

エネルギーの高度利活用

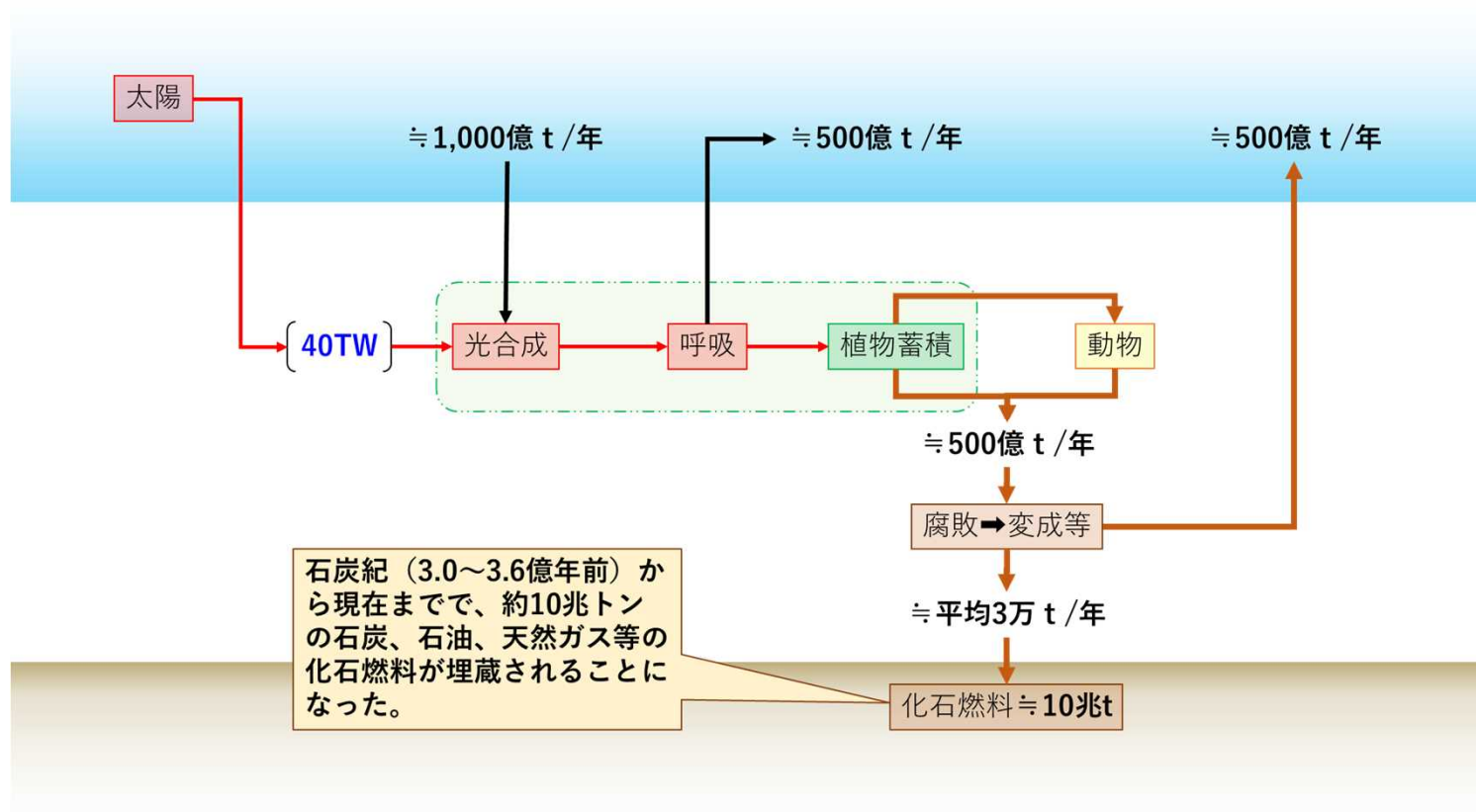
- ① 自然エネルギーは莫大。
- ② だが利用（消費）エネルギーは**自然環境と共生**すべく、節度を保つことが大前提。
- ③ そのため**浪費エネルギーを減らすことがカギ**
➔**エネルギーの高度利活用**。
- ④ **真に必要なエネルギーは確保すべき**。
人類の知恵、文明社会の構築、イノベーション。
- ⑤ いずれにせよ、**全てのエネルギーは宇宙へ**。
エネルギーは保存。
エネルギーはバランスしている。

このバランスを歪ませないことが大切！

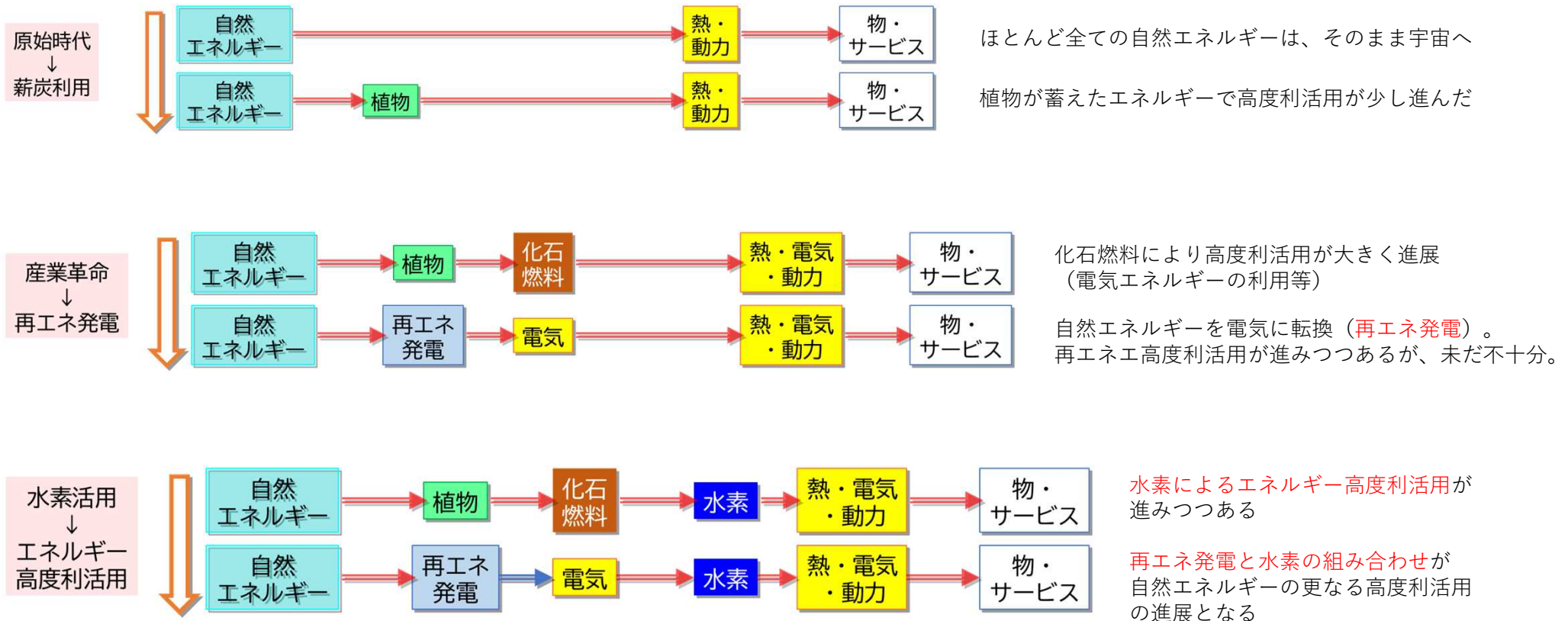


化石エネルギーとは、過去の太陽エネルギーの貯金

- ほんの極く一部だけれど、それでも長年蓄えて莫大なエネルギー量となった
- しかも、とても便利で使いやすい
- 人類は、化石燃料を通じて、エネルギーの高度利活用を覚え、文明社会を築き上げた

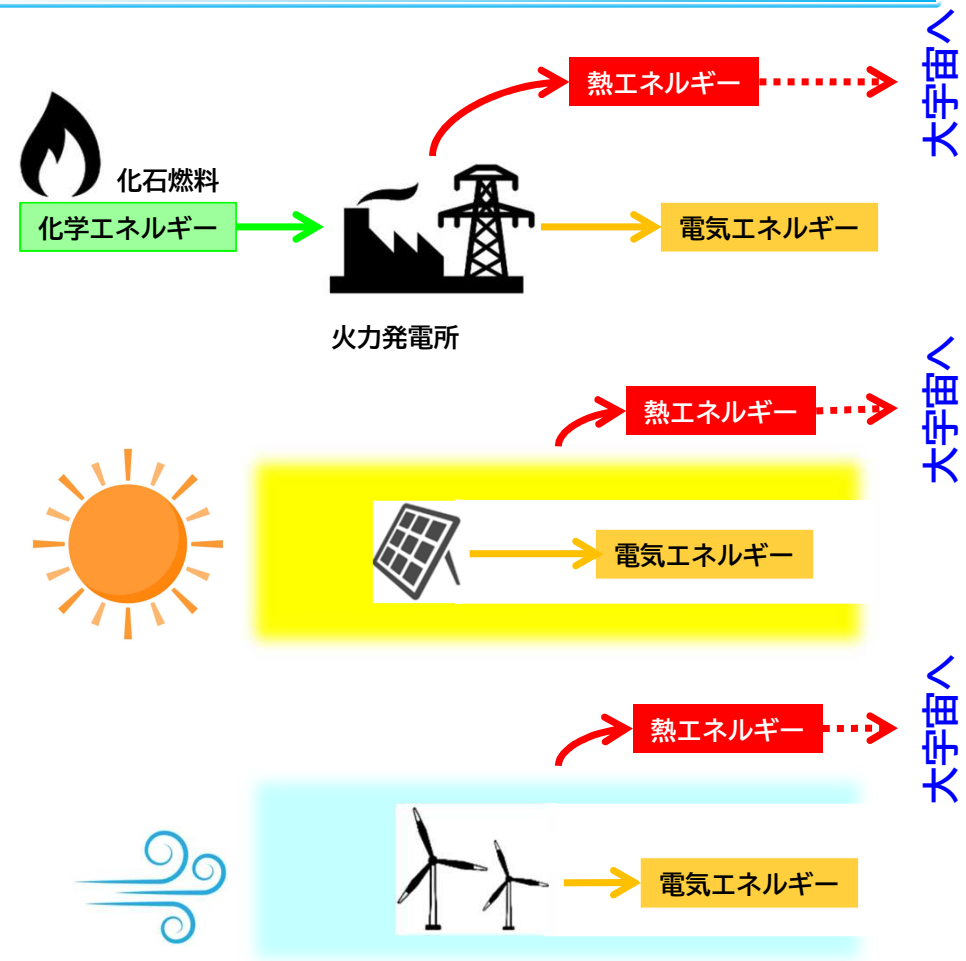
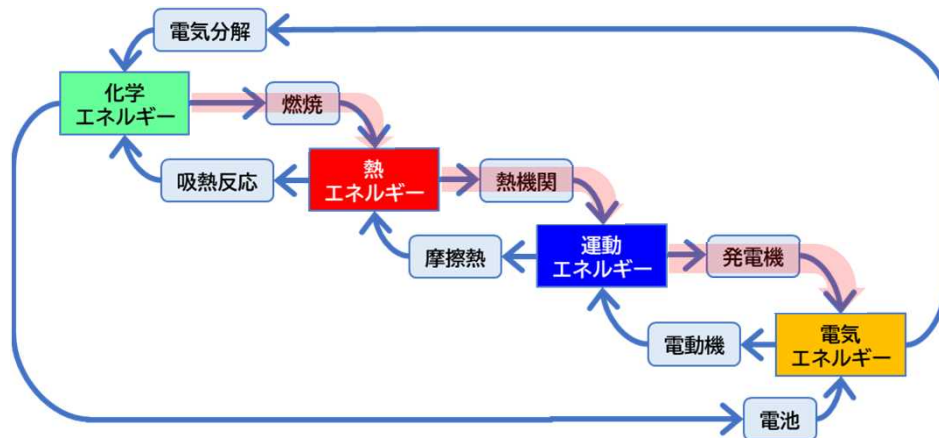


エネルギーの高度利活用への流れ



エネルギーを良く知り、賢く使おう

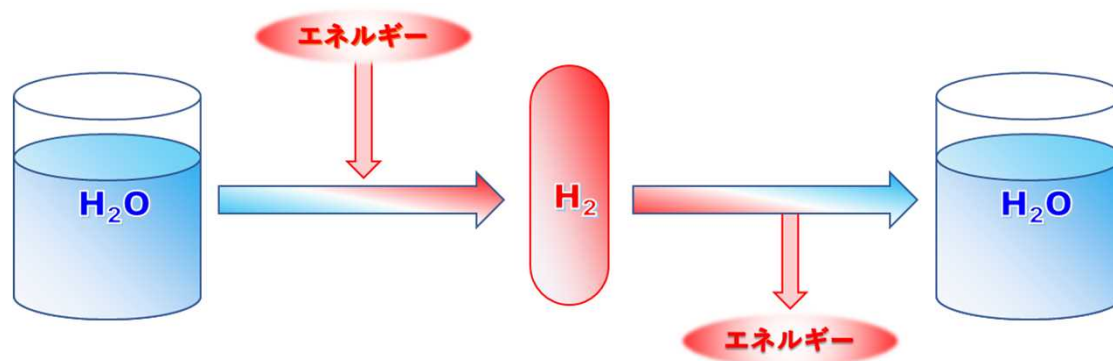
- エネルギーそのものは目には見えない。
- 太陽から来たエネルギーは、**様々な姿に形を変える。**
- そして、いつの間にか、**大宇宙へ消えて行く。**
- エネルギーを理解し、無理なく、上手に使おう
➡高度利活用



3. エネルギー高度利活用

水素と言うエネルギーキャリア

- 「エネルギーキャリア」、略して「エネキャリ」とはエネルギーの入れ物
- エネルギーそのものは目には見えない
- そもそもエネルギーはモノではない

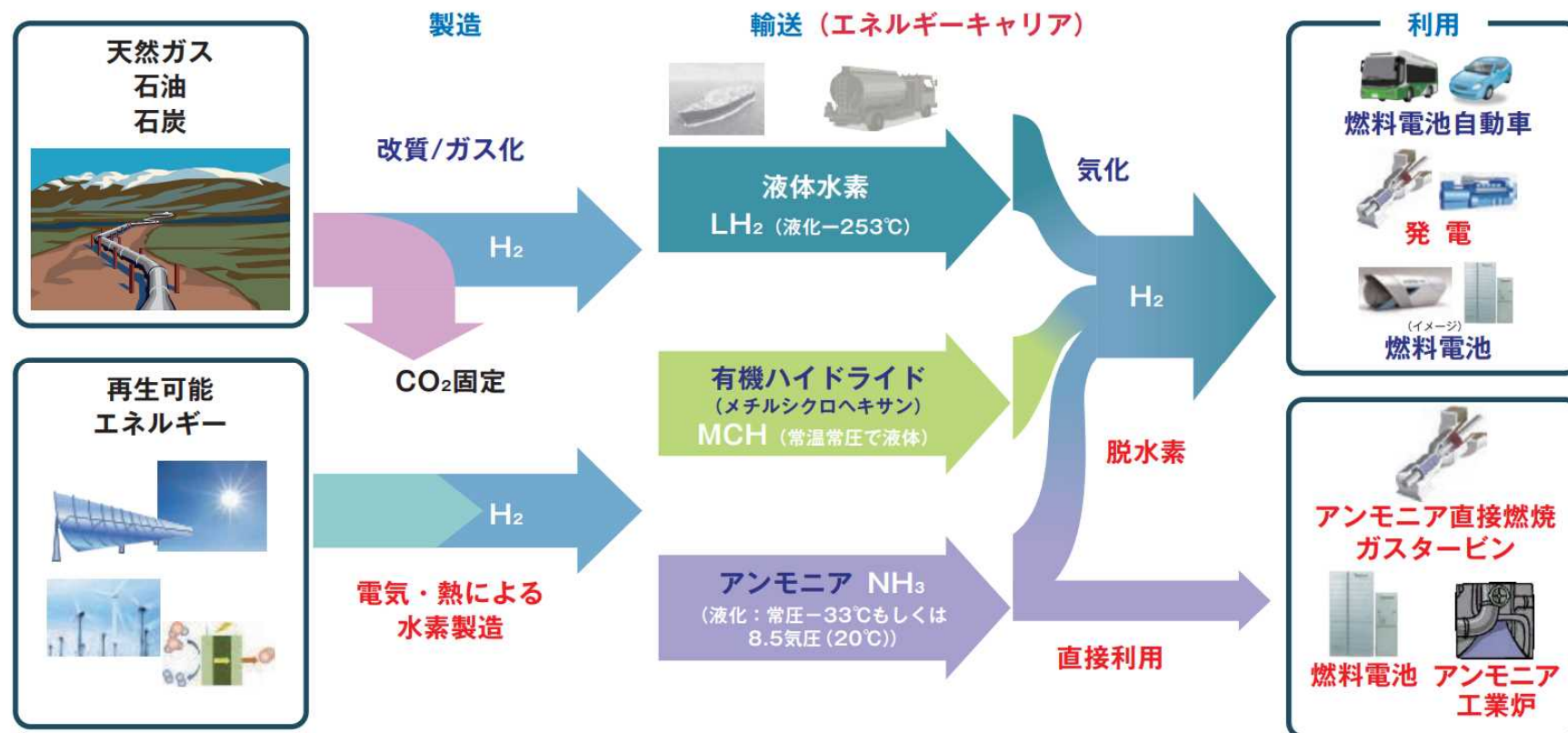


【参考】一般財団法人 新エネルギー財団 「最近の話題・キーワード」解説コーナー
 「エネルギー・キャリア」とは、文字どおり解すれば「エネルギーを運ぶもの」であるが、ここで言う「エネルギー・キャリア」は、「水素エネルギーを輸送、貯蔵する手段」という意味で使われている。
 水素を燃焼させることによって得られる水素エネルギーは、燃焼時に H_2O （水）しか排出しない。
 そして水素は、コストを考えなければ、再生可能エネルギーと地球上に豊富に存在する水から、無尽蔵につくることができる。
 水素エネルギーは、そういう意味では夢のエネルギーとされているが、その利用にあたっては、その基本物性に由来するいろいろな問題を解決する必要がある。

【参考】
 エネキャリとは別に、「水素キャリア」という用語も使われることがある。
 アンモニア等の水素化合物が水素キャリアに該当

代表的なエネルギーキャリア(水素キャリア)

- 主に海外からのエネルギー輸入の観点から3つのエネキャリアが注目されている



エネルギーキャリアとしての特性

純水素

●水素ガス：GH₂

水素の化学エネルギーに加え圧力、冷却エネルギーを供給する



- 軽量、低密度、クリーン
- 通常は高圧(700気圧程度まで)
- 常温で長期間の貯蔵が可能
- 乗用車等に適(圧力エネルギー)
- 大量貯蔵では圧力容器が重くなる

●液体水素：LH₂



- 常圧GH₂の1/800の容積
- 低圧(ほぼ常圧)で貯蔵可能
- 極低温のため断熱が重要
- 大量貯蔵に有利(熱侵入小)
- 冷熱エネルギー需要があれば有利

水素キャリア

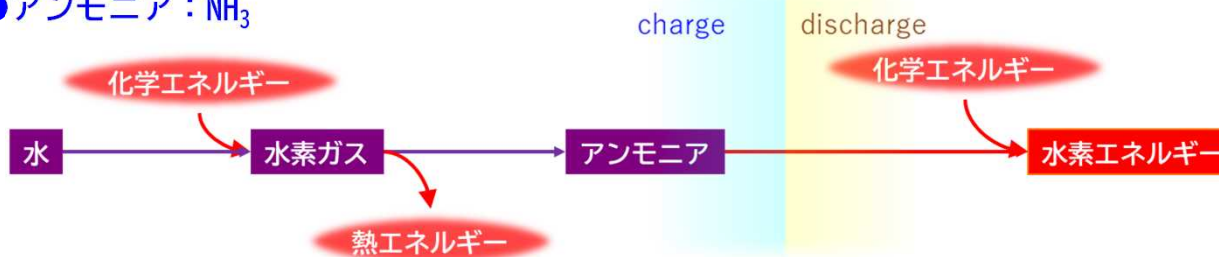
●有機ハイドライド：MCH

水素の化学エネルギーの一部を熱エネルギーとして排出する



- 常温、常圧で貯蔵可能
- 需要地に廃熱、余剰熱があれば有利(水素エネルギーの取り出しの追加エネルギー)
- エネルギー輸送能力は、やや小(供給地で一部エネルギーを廃熱)

●アンモニア：NH₃

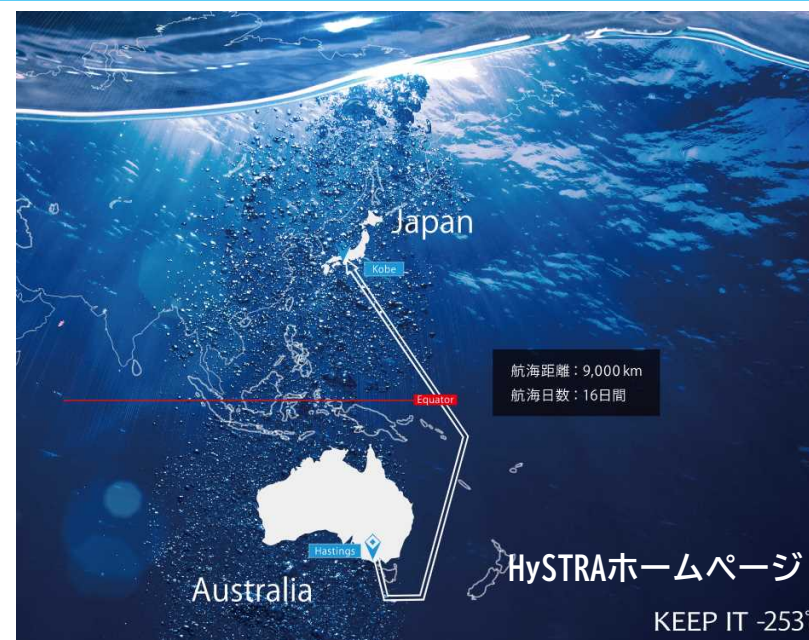


- 常温、常圧で貯蔵可能
- 需要地に廃熱、余剰熱があれば有利(水素エネルギーの取り出しの追加エネルギー)
- エネルギー輸送能力は、やや小(供給地で一部エネルギーを廃熱)

4. いよいよ始まった 水素社会構築

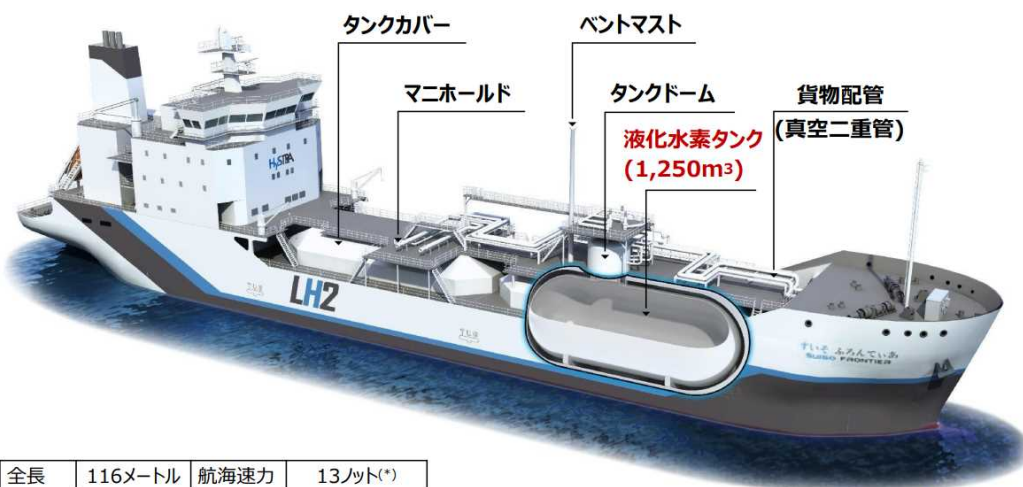
水素社会の先進地「兵庫・神戸・姫路」

- 2011年 東日本大震災
- 2014年 第4次エネルギー基本計画
水素・燃料電池戦略ロードマップ
- 2016年 パリ協定発効
- 2018年 第5次エネルギー基本計画
水素基本戦略シナリオ
- 2020年 菅首相：カーボンニュートラル宣言
内閣府：グリーン成長戦略
- 2021年 第6次エネルギー基本計画



液体輸送パイロット船

- 世界初の液体水素タンカー。1250m³の液化水素タンクを搭載
- 兵庫県神戸市の造船所で建造。2019年12月に進水式



全長	116メートル	航海速度	13ノット(*)
全幅	19メートル	航続距離	11,300海里(*)
定員	25名	推進方式	電気推進

1ノット = 1海里/時 = 1.852km/時

提供：HySTRA

川崎重工業 ホームページ

2022年1月 豪ビクトリア州ハイスティング



豪州に到着した液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」

液体水素受入れ基地

ハイタッチ神戸

兵庫県神戸市 神戸空港島

- 2500m³日本最大、世界トップクラスの液化水素タンク
 - 従来の日本最大は540m³（種子島宇宙センター）
 - 世界最大は3218m³（NASAケネディ宇宙センター）



- 2022年4月すいそふろんていあ帰港、日豪サプライチェーン完遂記念式典



川崎重工業 ホームページ

兵庫の全県に広がる水素産業振興

神戸エリア（ハイタッチ神戸等）を皮切りに、播磨エリア（再エネグリーン水素等）、播磨エリア（大規模水素利活用、大型受入れ基地等）の可能性が広がる

兵庫県における水素産業振興の方向性



- ・ 播磨エリアは火力発電所や鉄鋼・化学工業など、水素需要が見込まれる**エネルギー多消費型の産業が集積**
- ・ 加えて大企業から中小企業まで**金属素材・加工産業の集積**
- ・ 神戸エリアでは、**世界初の「液化水素運搬船」実証実験の成功**

全国一の水素産業クラスターの可能性大

水素技術勉強会 第2回研究会

神戸港の先進的な取組

世界初の「液化水素運搬船」実証成功

豪州（褐炭水素製造プラント）
⇒ 神戸液化水素荷役実証ターミナル

液化水素貯蔵タンク (2,500m³)



液化水素運搬船「すいそふるんていあ」
液化水素タンク (1,250m³)

HySTRA提供

姫路港の優位性

港湾名	LNG輸入量(千t)
1 木更津港	20,746
2 千葉港	18,753
3 姫路港	16,935
4 名古屋港	14,923
5 川崎港	14,506
6 四日市港	11,994
7 堺泉北港	7,637
8 新潟港	7,172
9 横浜港	6,712
10 直江津港	5,255

出典：R2年港湾統計調査（国連交通省）

2022年9月6日
水素技術勉強会における兵庫県講演資料

そして、その先への活動も始まっている

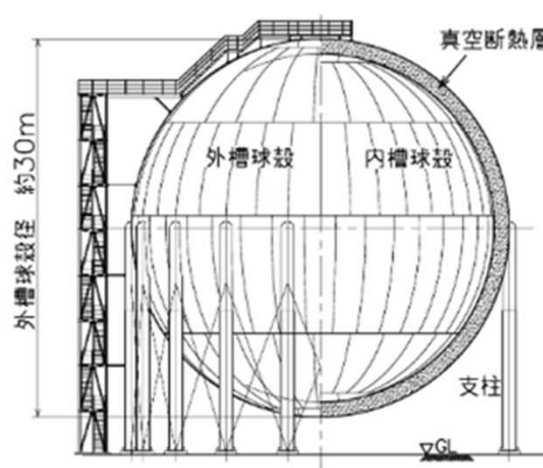
- 160,000m³型 液化水素運搬船の
基本設計承認を取得 2022年04月22日



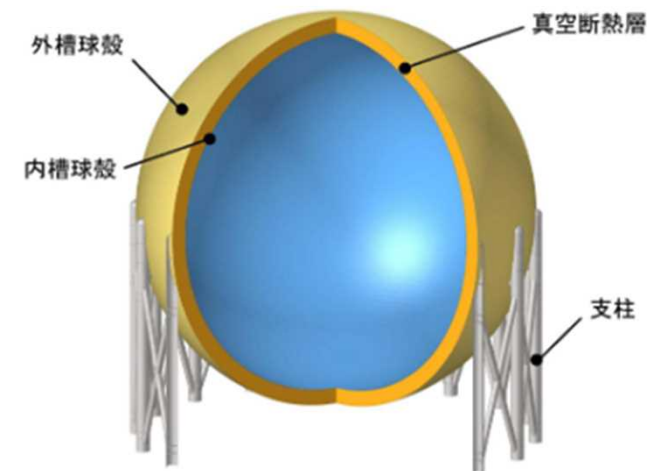
全長：約346m 幅：約57m 喫水：9.5m
 タンク容積：160,000m³
 (40,000m³×4基、約1万トンの液化水素を積載可能)

- 世界最大級の「11,200m³球形液化水素貯蔵タンク」の基本設計を完了

2020年12月24日



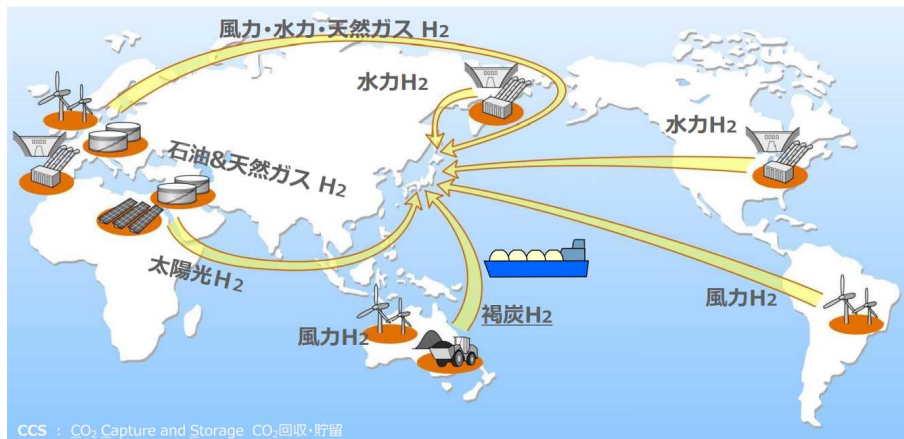
11,200m³の液化水素貯蔵タンク完成イメージ



断面イメージ

5. これからが本番、 カーボンニュートラル社会構築

「兵庫・神戸・姫路」から日本全国へ、そして全世界へ貢献

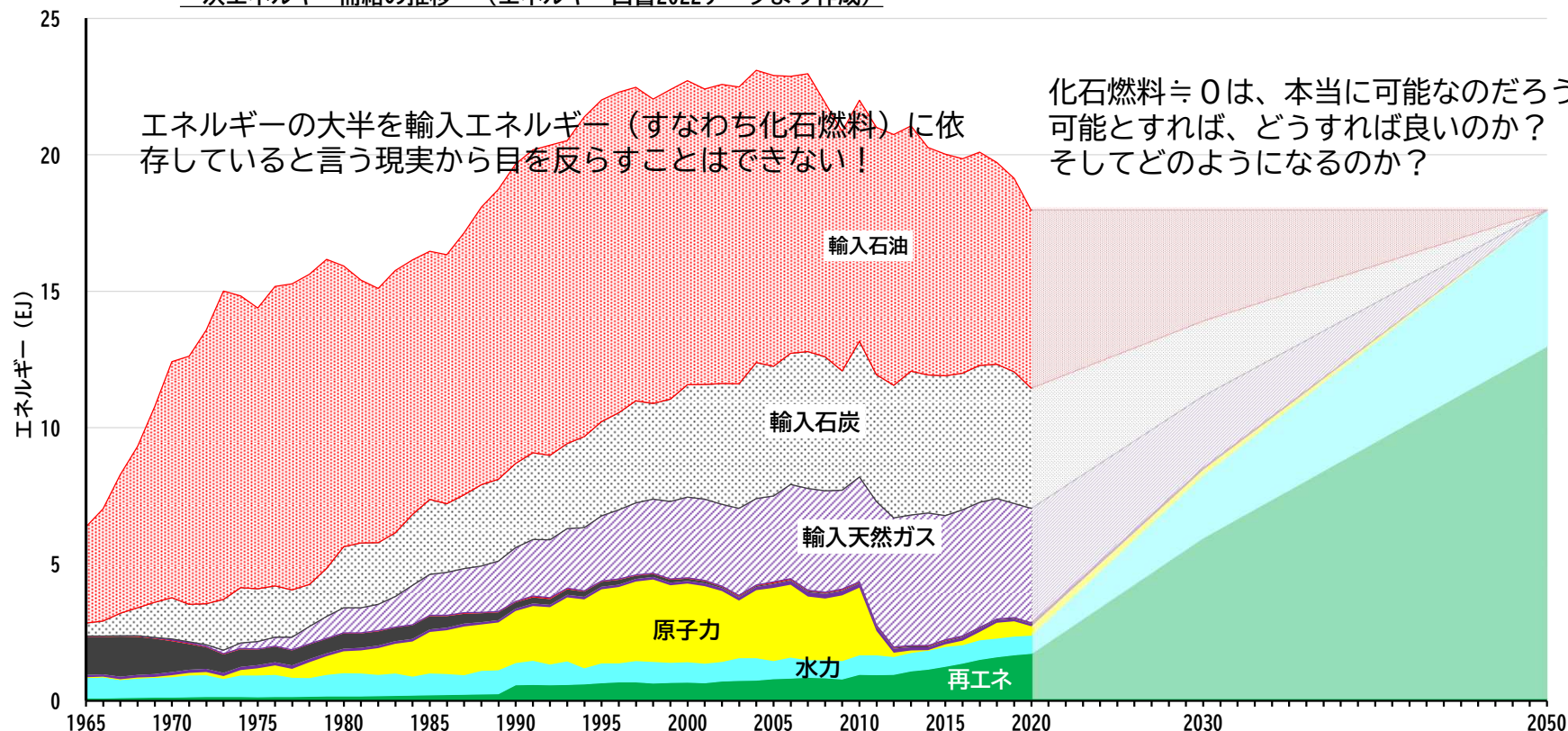


- カーボンニュートラルは、**人類共通の課題**
- 全世界と**協調、連携**
- **日本全国**として必要なクリーンエネルギーを確保
- **全世界**に必要なクリーンエネルギー確保にも貢献
- 水素先進基地として、**製品、技術、イノベーション**で、全世界へ貢献

素朴な疑問---2050年カーボンニュートラルの現実性？

2030年：46%削減、再エネ（+水力）54%、 2050年：再エネ（+水力）実質的に100%

一次エネルギー需給の推移（エネルギー白書2022データより作成）



まずは省エネから

- 1973年石油危機：日本は省エネで乗り切った ➡ 世界トップクラスの省エネを達成！
- 再び世界最高水準の省エネにチャレンジ
- GDP:年率1.4%の経済成長を確保

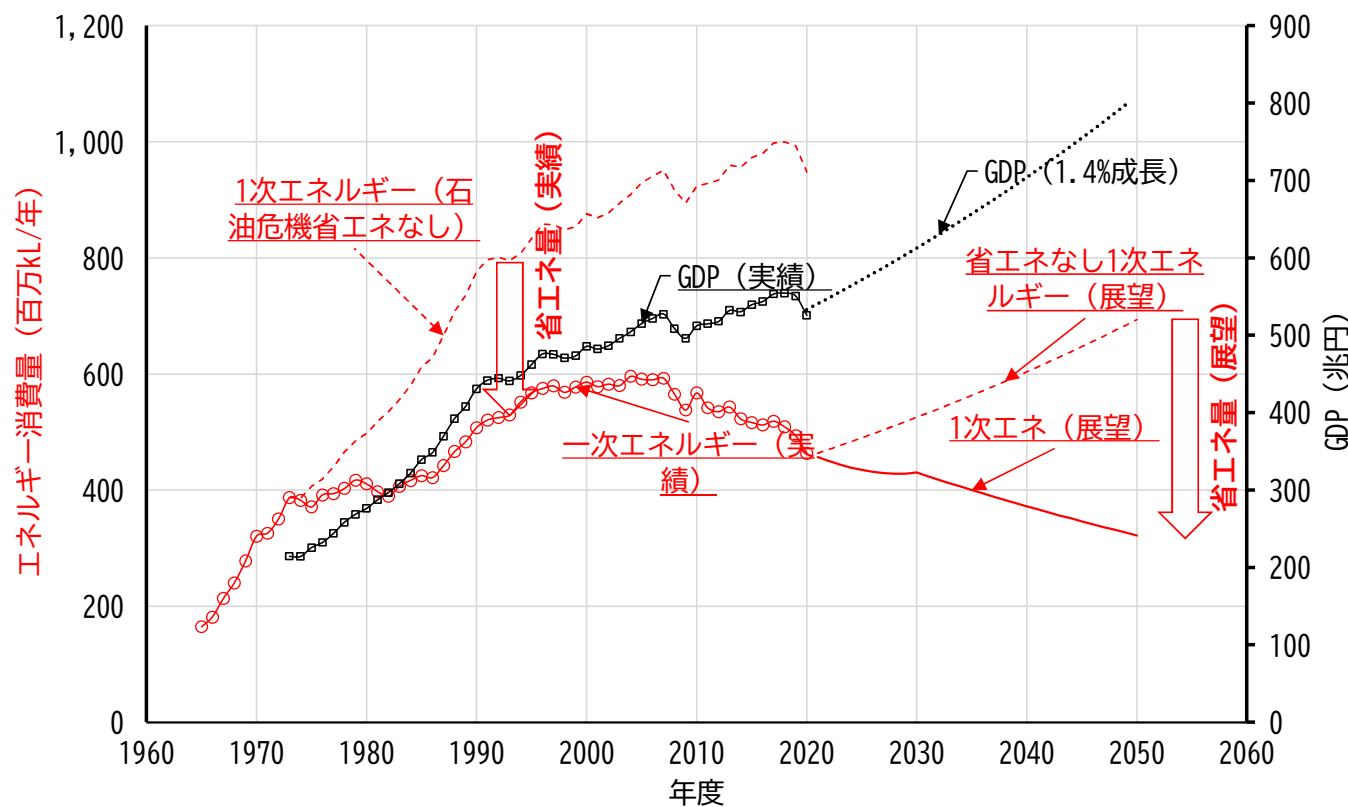
エネルギー消費効率

- H27策定時のエネルギーミックスにおいては、省エネルギー対策を徹底して進める結果、エネルギー効率は石油危機後と同程度であった。
- 野心的な省エネルギーの深堀りを目指した結果、石油危機後を上回るエネルギー消費効率となる。



年率2.8%のエネルギー効率改善に相当

資源エネルギー庁資料から

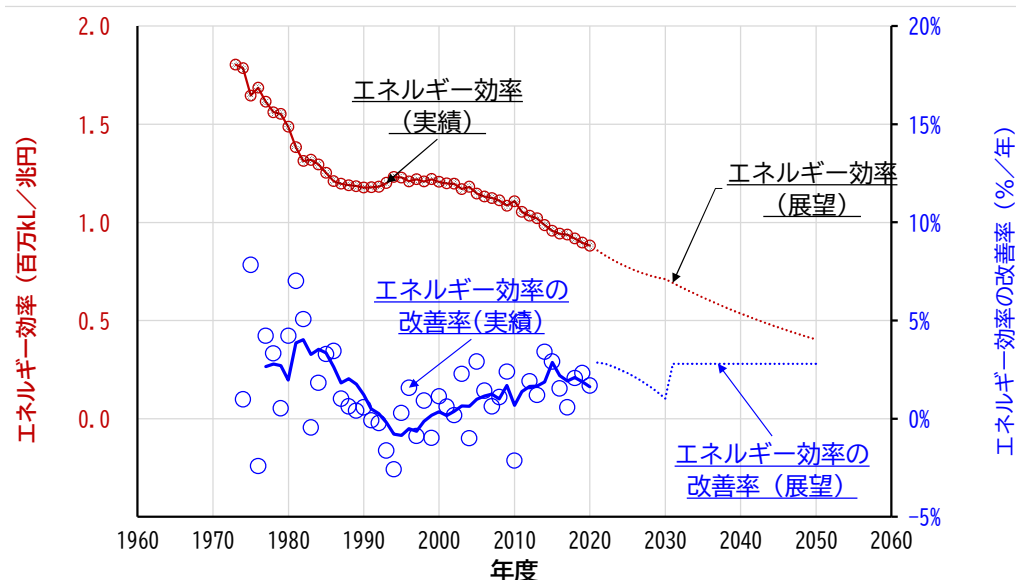


エネルギー白書2022データ等から試算

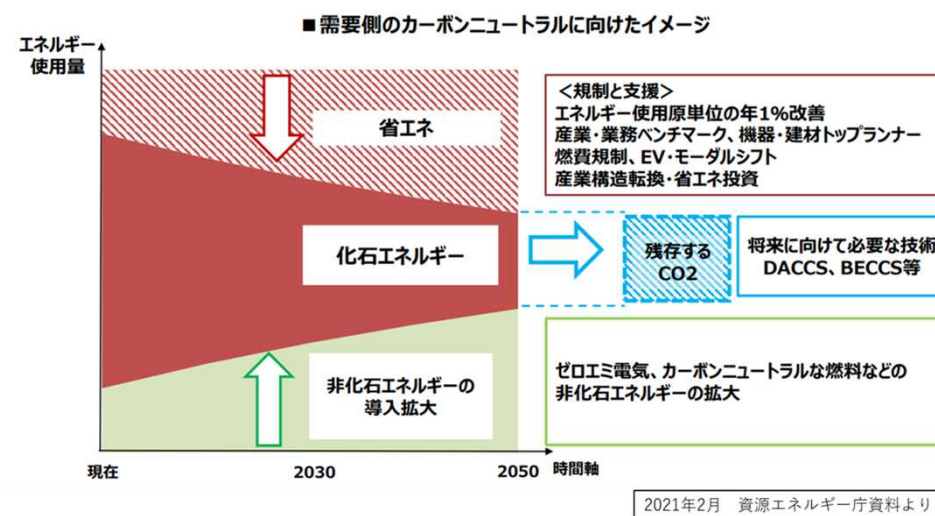
省エネだけでは目標達成は難しい

- 年率2.8%のエネルギー効率改善（原単位低減）が必要
- 現行省エネ法の判断基準における事業者の努力目標（年率1%の原単位低減）の2.8倍！
- 更なる上積みは難しそう

- 化石を「減らす」だけでは限界
- 非化石を「増やす」努力も不可欠
- 「省エネ」と「非化石拡大」の両輪が必要

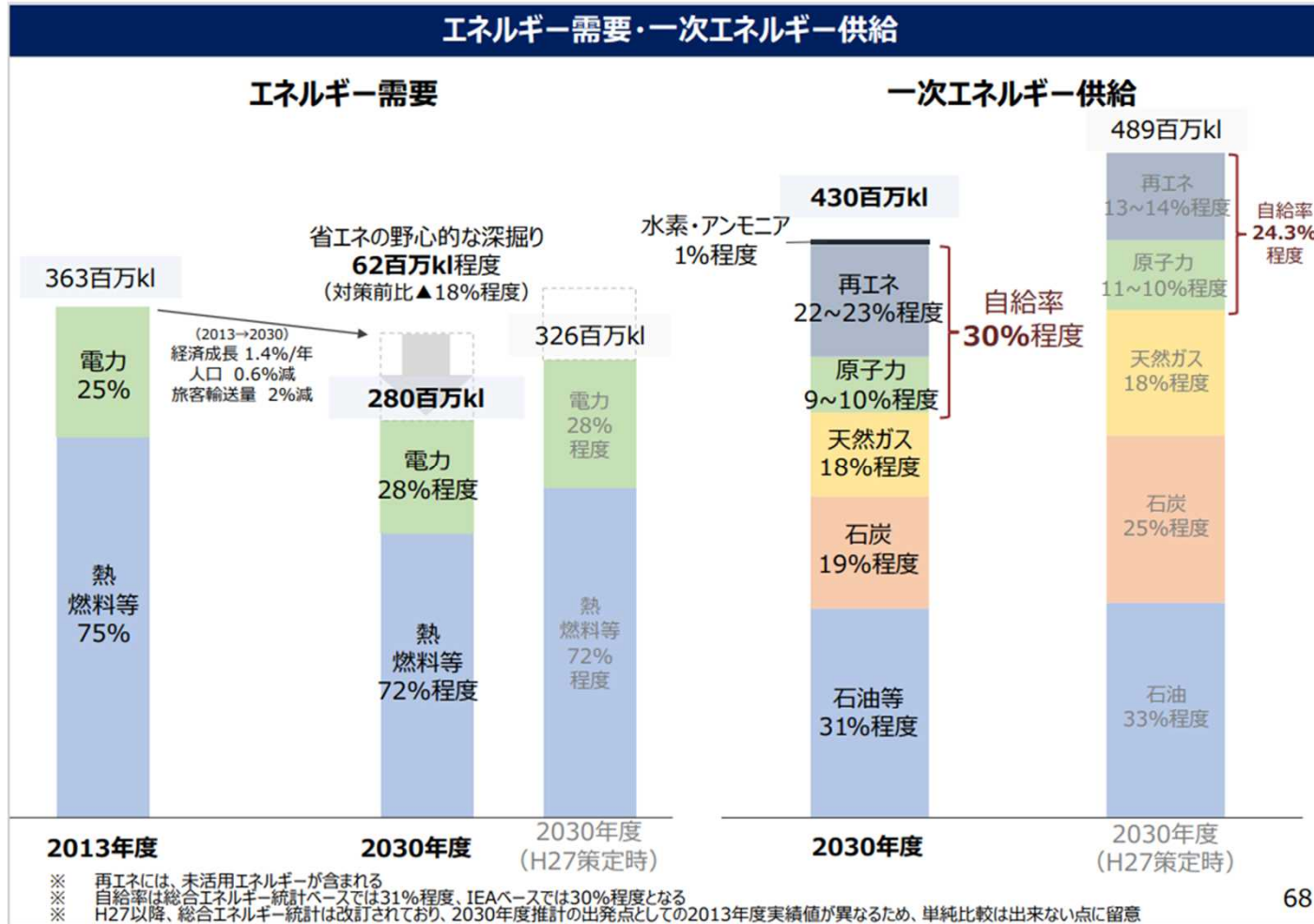


エネルギー白書2022データ等から試算



(注)
「化石」から「非化石」への切替奨励だけでは限界がある。
「非化石」の増大そのものも求められつつある。

2030年の具体的目標はどうなっているか？



- 一次エネルギー供給を430百万klに低減
- 2020年実績
463.5百万klから7.23%削減

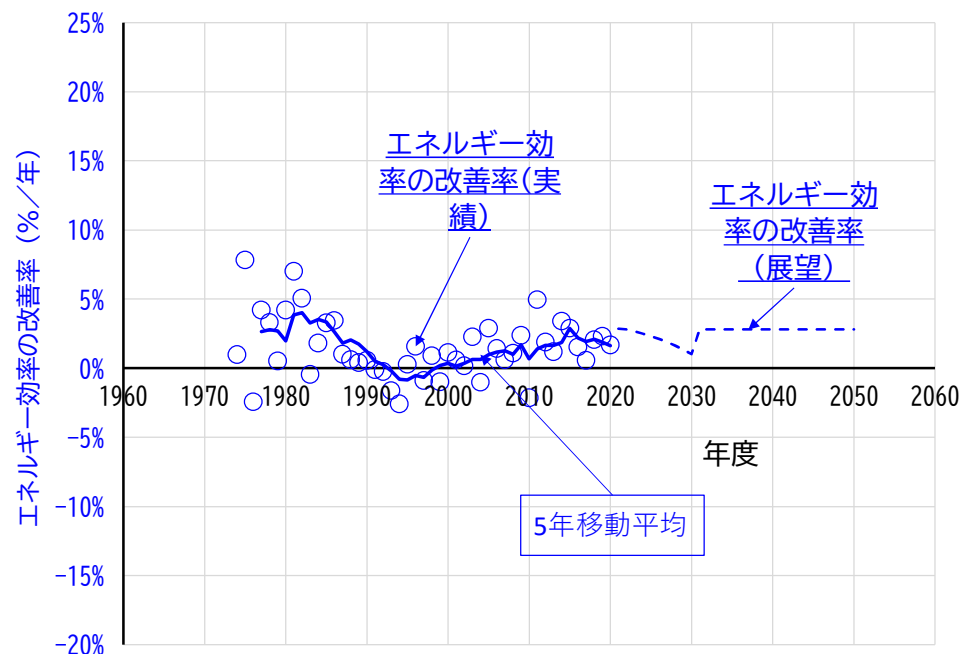
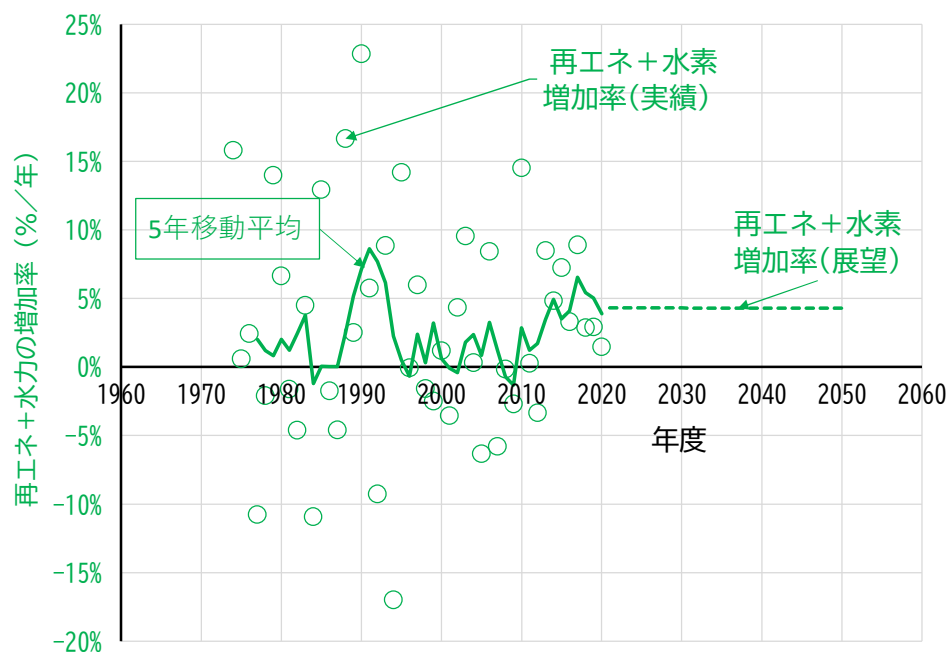
- 一次エネルギーの自給率30%程度を目指す

2020年国産(≠非化石)実績

再エネ	: 9.7%
水力	: 3.7%
原子力	: 1.8%
計	: 15.6%

目標達成を試算する

- 年率4.9%の再エネ増加率が必要
- ~2020年は原子力を除く
2021~2030年は原子力を含む
- 2031~2050年は原子力不明
- 現行省エネ法の判断基準における事業者の努力目標（年率1%の原単位低減）の4.9倍！
- 今後の省エネ目標（展望）の年率2.8%よりも更に高い改善が求められる！



省エネ大国の日本が取り組んできた効率改善のノウハウ

- 単年度にまとめて大幅な改善は難しい
- 中長期的（5ヶ年程度を目安）に毎年少しずつ改善することで、大きな改善目標を達成

毎年A%改善、N年間の取組 ⇒ $(100 + A)\%$ のn乗の改善達成！ **（複利効果）**

継続的な取組

省エネのノウハウの応用

- ひとつの工程だけで大幅な改善は難しい
- 多くの段階の工程（例えばエネルギーサプライチェーン）で、それぞれ少しずつ改善することで、大きな改善目標を達成

1～nのn段階の工程、各段階で少しずつ（ $A_i\%$ 、 $i = 1 \sim n$ ）改善

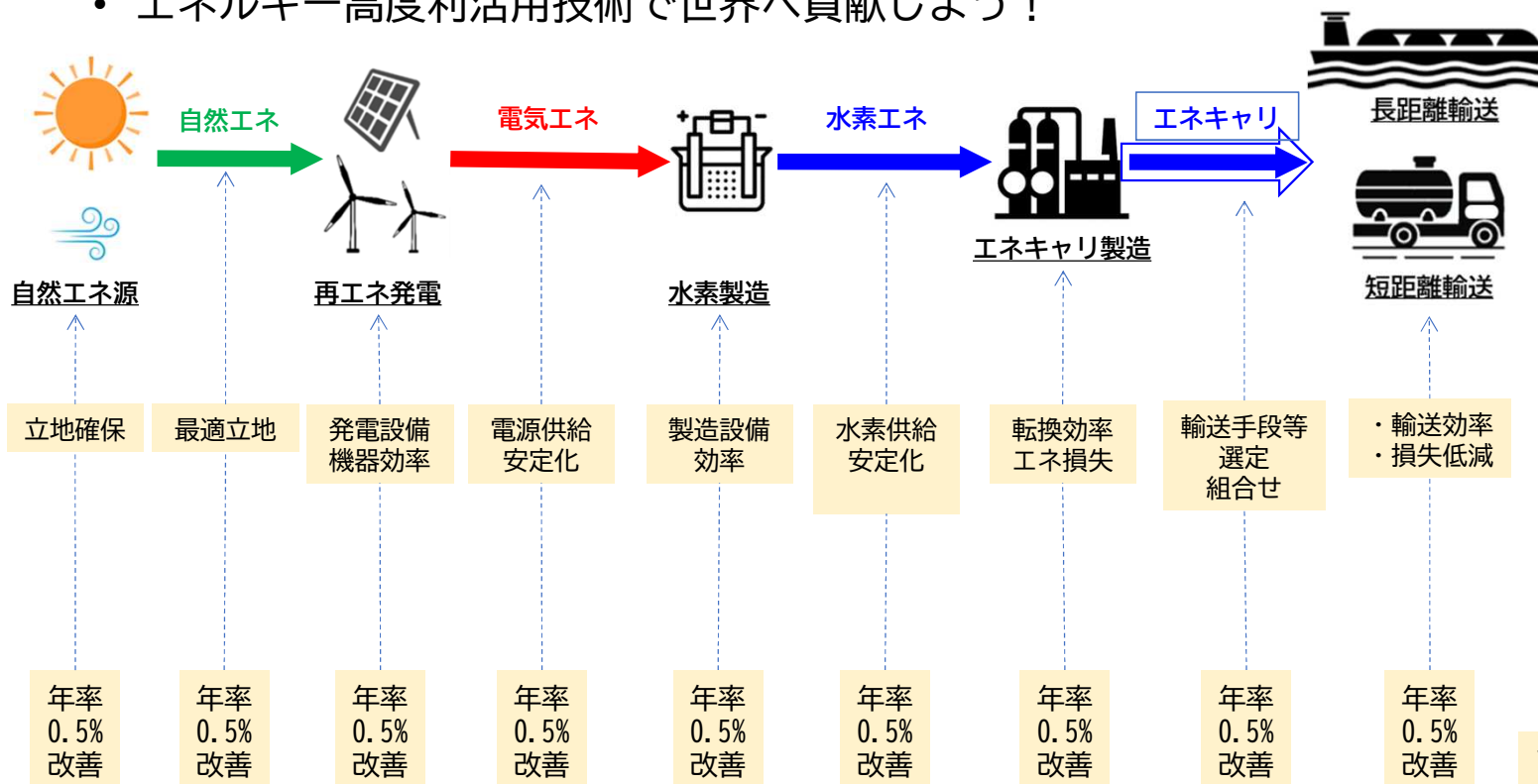
⇒ 全工程で $(100 + A_1)\% \times (100 + A_2)\% \times \dots \times (100 + A_n)\%$ の改善達成

（相乗効果）

全員参加、協力・連携の取組

エネルギー供給の各段階で小さな改善の積み重ね

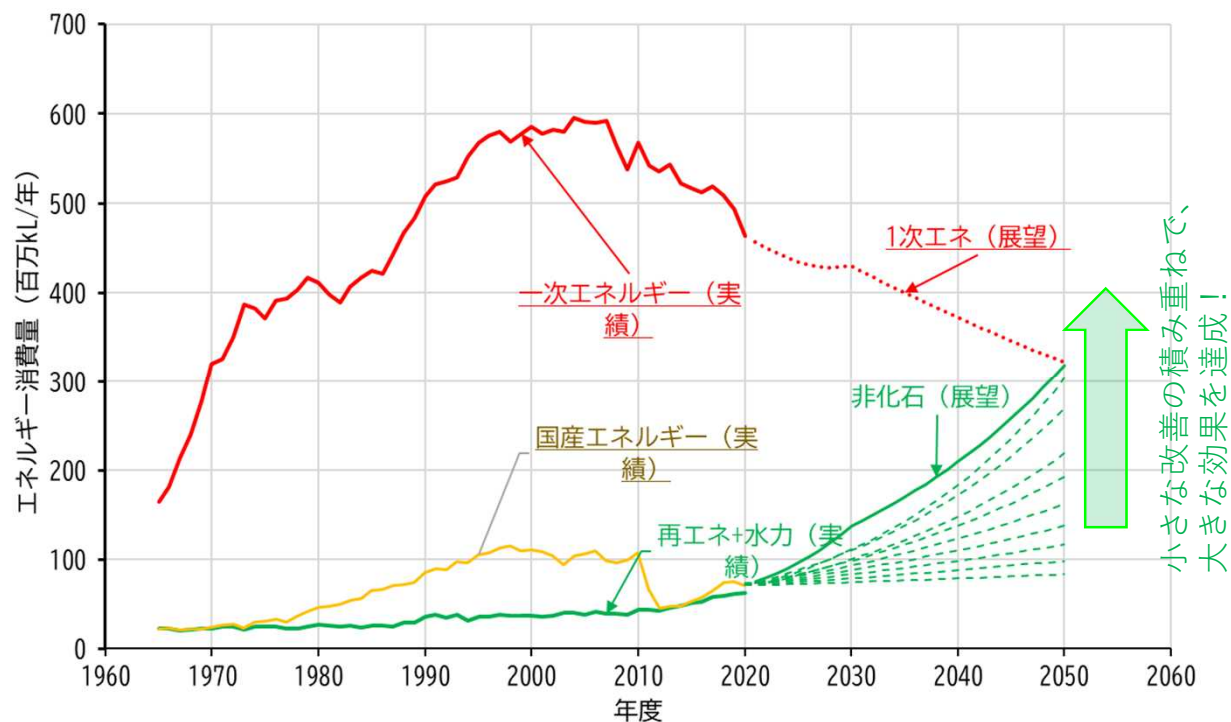
- 日本はエネルギー利用の改善（省エネ）で同様の取組の実績
- エネルギー高度利活用技術で世界へ貢献しよう！



1.005⁹=1.049 4.9%の改善
30年で(104.9%)³⁰=415%、約4.15倍に増加！

試算結果 概要

- 種々の方策、小さな改善の積み重ねで大きな効果を達成！
⇒連携と協力、種々の改善の相乗効果の発揮が求められる
- 毎年、少しずつ、中長期的に取り組みことで、非化石エネルギーの拡大も不可能ではない
⇒地道な改善の継続で、目標の達成は可能



それぞれの段階も連携と共創でエネルギー高度利活用

【例】

(高精度低損失バルブで10%の改善) × (流量システムの回路最適化で10%改善) × (最適レイアウトで10%改善)

110% × 110% × 110% = 133.1% → 33.1%の改善!

～液化水素基地の例～



液化水素基地

コア・コンポーネント

液化水素ローディングシステム
 液化水素タンク 液化水素ポンプ
 BOG処理設備 液化水素気化器
 ローリ出荷設備 保安防災設備

2次・3次調達品 (上記部品等)

配管・バルブ類 計装・電気設備 熱交換器
 各種計測器・検知器類 真空排気ポンプ 各種安全装置

構成要素に展開

中堅・中小企業が得意とする製品群が数多く存在

但し 液化水素での実績は少ない

コアコンポーネントの効率 10%向上

コアコンポーネントの効率 10%向上

部品の効率 10%向上

～液化水素運搬船の例～



液化水素運搬船
Cargo Part

コア・コンポーネント

カーゴタンク、貨物取扱機器
 配管・弁・継ぎ手類、計装機器

2次・3次調達品 (上記部品等)

カーゴポンプ、ボイルオフガス処理装置、真空ブロワ、
 積層真空断熱材、GFRP支持材、ベローズ
 真空断熱二重管、配管・バルブ類、各種計測器

構成要素に展開

中堅・中小企業が得意とする製品群が数多く存在

但し 液化水素での実績は少ない

2022年9月6日水素技術勉強会におけるNIRO講演資料を参考に講演者が作成

おわりに

最後まで、ご清聴ありがとうございました。

神戸大学はオープンイノベーションで水素社会構築への貢献に努めます。

兵庫、神戸、姫路から

日本全国、そして全世界のカーボンニュートラルを目指し

連携・共創して参りましょう

