

日本機械学会2024年第1回ハイブリッドセミナー

「持続可能な未来の実現のための技術ロードマップ」

第1部：2050年に向けたJSMEメンバーの技術ロードマップと社会像の展望



# 技術ロードマップと社会課題への挑戦

2024年3月21日

国立研究開発法人

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)

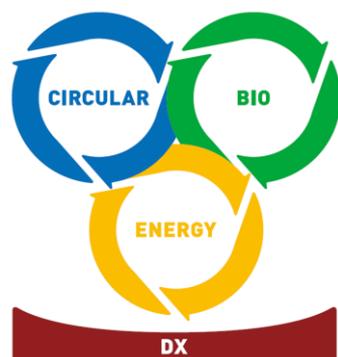
技術戦略研究センター (TSC)

サステナブルエネルギーユニット フェロー

福島国際研究教育機構 (F-REI)

エネルギー分野長

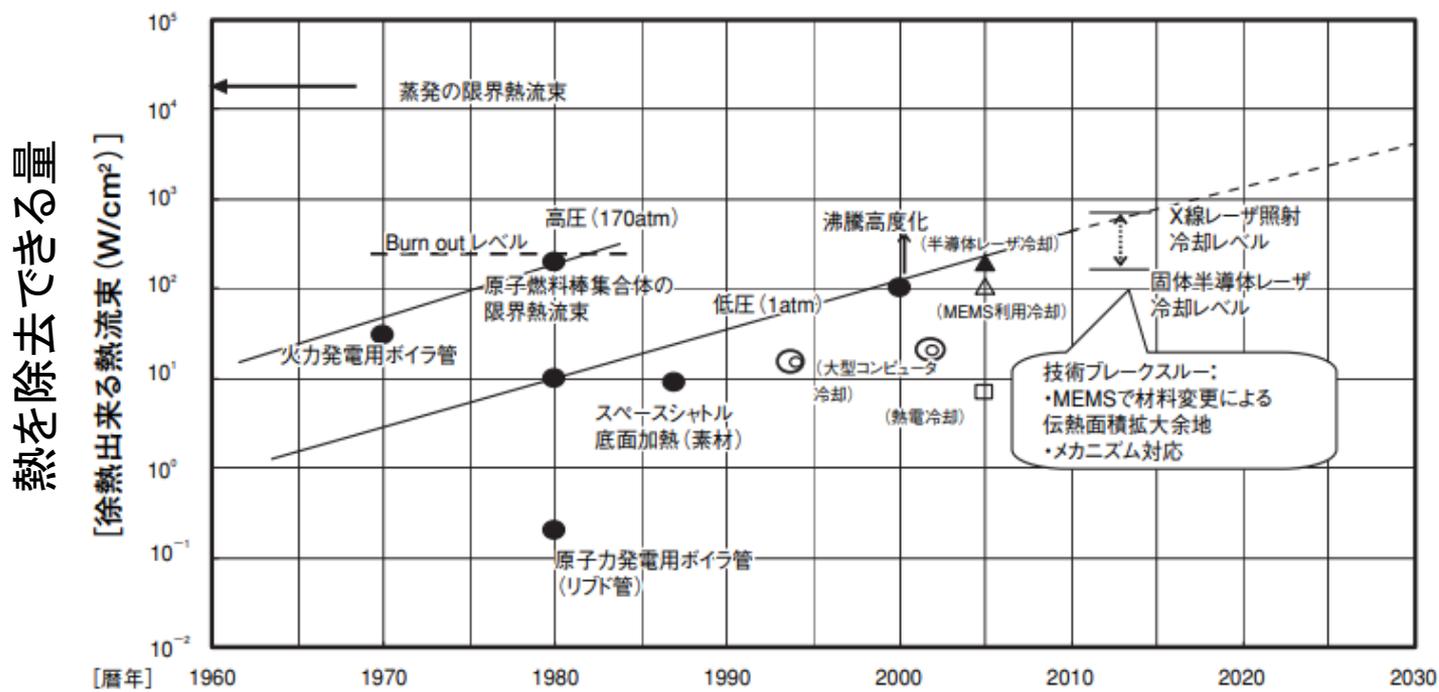
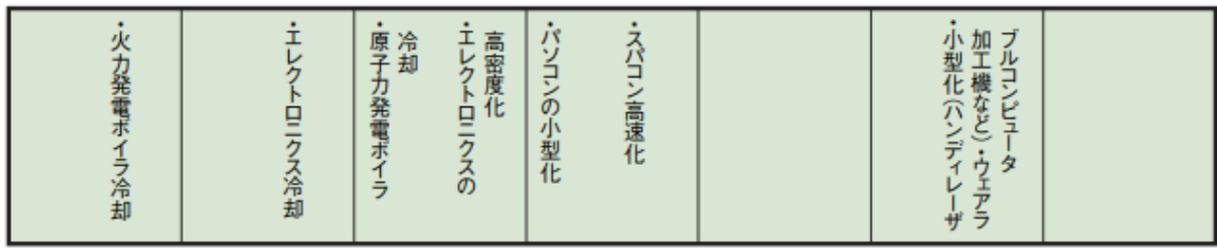
矢部 彰



- 1. **技術開発の歴史は、機能をいかに高性能に発揮させるかの歴史**である。（**技術ロードマップの議論の有効性を根拠づけるもの**）  
「熱工学」における技術開発の歴史は、**熱に関係する機能をいかに発揮させるかの歴史**である。
  - 1-1. **より多くの熱を除去したい**（除熱熱流束の増大）
  - 1-2. **熱をなるべく逃がさない**（断熱技術）
  - 1-3. **発熱量の増大する電子機器を冷却したい**（電子機器冷却技術）
- 2. **技術ロードマップと社会課題への挑戦**
  - 2-1. **技術ロードマップの検討対象の移り変わり**  
（フォアキャストの視点の追求）
  - 2-2. **技術ロードマップと社会課題への挑戦**  
（バックキャストの視点での検討段階へ）
- 3. **技術ロードマップの活用の歴史と展望**
  - 3-1. **温度に基づく熱のカスケード利用の推進の歴史と展望**
  - 3-2. **SDGsロードマップへの展開**
- 4. **技術開発の歴史から見た重要な視点のまとめ**

- 冷却等熱を除去できる量（除熱熱流束）のニーズの変遷、数値の増大割合、今後の増加の可能性と、そのメカニズム
- 歴史的には、ボイラーの熱流束(配管の過熱防止)、宇宙船の大気圏再突入、原子炉事故防止、電子デバイスの冷却、レーザー冷却（本体と照射物体）と推移

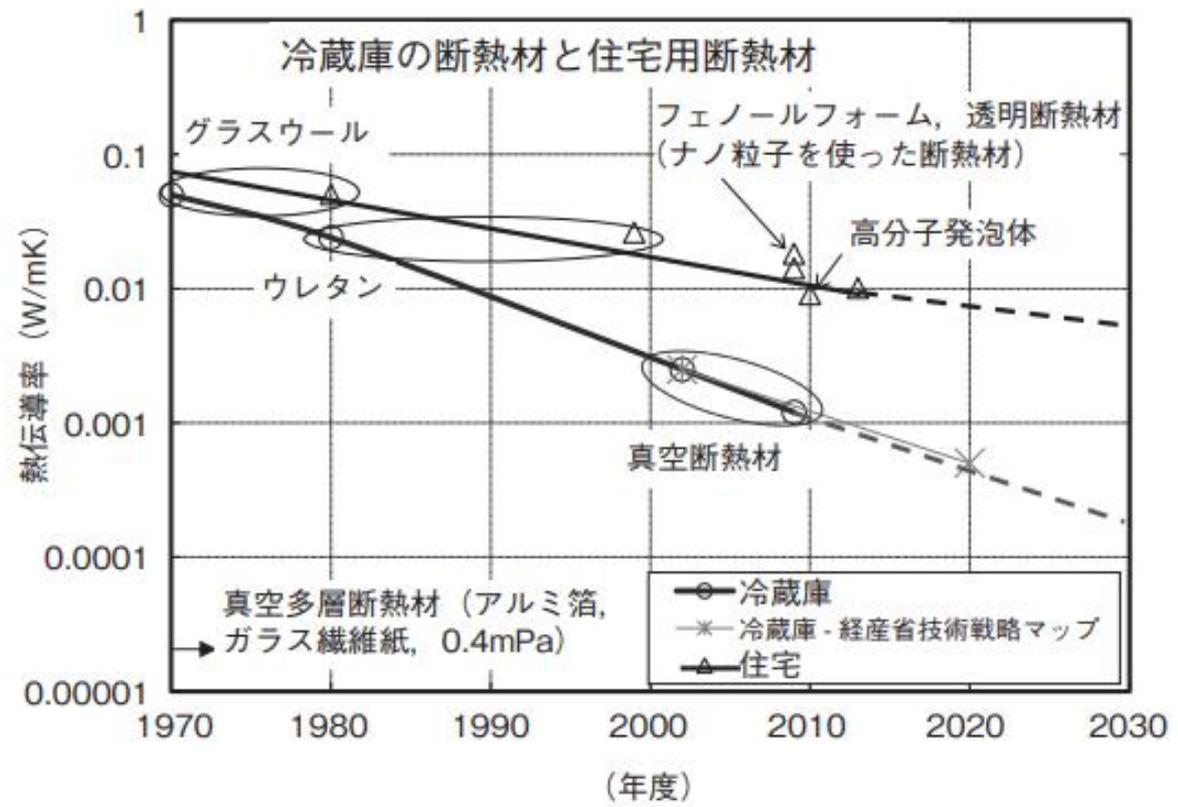
社会・技術ニーズ



日本機械学会誌、  
Vol.110,  
No.1067  
Oct. 2007  
JSME技術  
ロードマップ

# 1-2. 熱をなるべく逃がさない (断熱技術の進展の歴史)

- 断熱技術は、冷蔵庫の断熱、住宅の断熱、低温機器の断熱、宇宙船の断熱などのニーズに対応しながら、性能を向上させてきた。省エネルギー技術が牽引し、冷蔵庫用の断熱材の技術開発が先行し、住宅用断熱材に展開されている。
- 技術動向は、まず材料の熱伝導率を小さくし、次に、材料内の輻射成分による伝熱量を低減している。

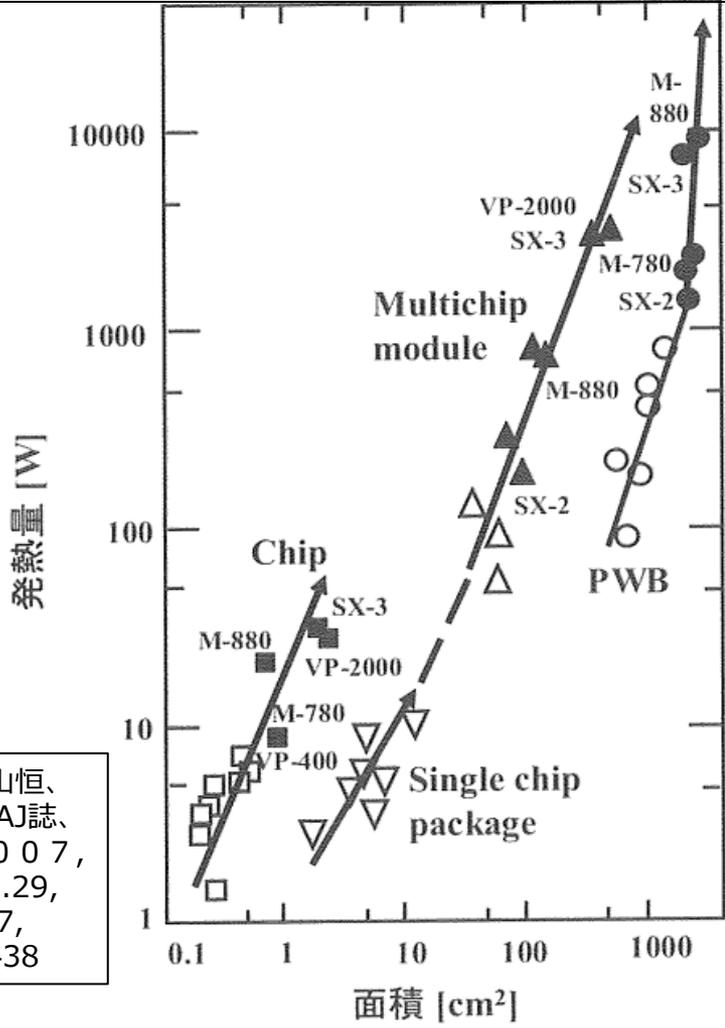


日本機械学会誌、  
小特集 技術ロード  
マップから見る2030  
年の社会、2016年  
5月、Vol.119,  
No.1170, p.72

断熱特性のロードマップ

# 1-3. 発熱量の増大する電子機器を冷却したいという電子機器冷却の歴史

- 下図は、1970年代半ばから1980年代末にかけての**大型計算機の発熱量の増大の歴史**。チップ、モジュール、プリント基板（PWB）の各々に対して。
- **白抜き**は、**空冷機**。 **黒塗り**は、**水冷機**。

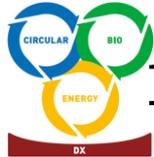


- 1990年に入ると冷却技術ニーズは、一端低下。
- その理由は、**バイポーラーデバイス (BJT) から CMOSデバイスへの転換**が行われたため。
- BJTでの**冷却コストが大きくなりすぎたため**と、**CMOSの発熱量が小さいため**であった。

- 2000年に入って、CMOSをベースデバイスとする**マイクロプロセッサの発熱量が急速に増大し、冷却技術のニーズが再び増大**。
- 冷却デバイス設置に狭い空間しかない、狭い空間のため周りの熱環境で温度上昇し、寿命を劣化させるなどが理由

- 今後は、ルーターなど使用量の増大に伴い、**電子デバイスの発熱量がさらに増大する。微細化、三次元配線、光利用**などで発熱量の減少は進むが、大きな技術開発のニーズ。

中山恒、  
REAJ誌、  
2007、  
Vol.29、  
No7、  
p.438



ICT分野の電力消費量は、システム利用頻度の増加(AI, ChatGPT等)、データトラフィック量に比例し、世界全体で右肩上がりに増大。

ICT分野の国内電力消費量の試算の一例(3)(4)を表1に示す。現状では、全電力消費の4%程がICT分野の割合であるが、2030年、2050年にはトラフィック拡大の成り行きで算定すると、2016年時点の総電力消費量に対して、150%、17600%となり、莫大な数値になる。

ICT分野は、年々拡大する成長産業分野であることから、従来にも増して、積極的な省エネや環境面へ配慮・対応が不可欠である。

表1 国内のICT分野の電力消費量の試算 (3)(4)

項目	2016年	2030年	2050年
全世界のIPトラフィック (ZB/年)	4.7	170	20,200
国内ICT消費電力 (TWh/年)	41	1,480	176,200
2016年度国内総電力消費量(1,025 TWh) 比	4.0%	150%	17600%

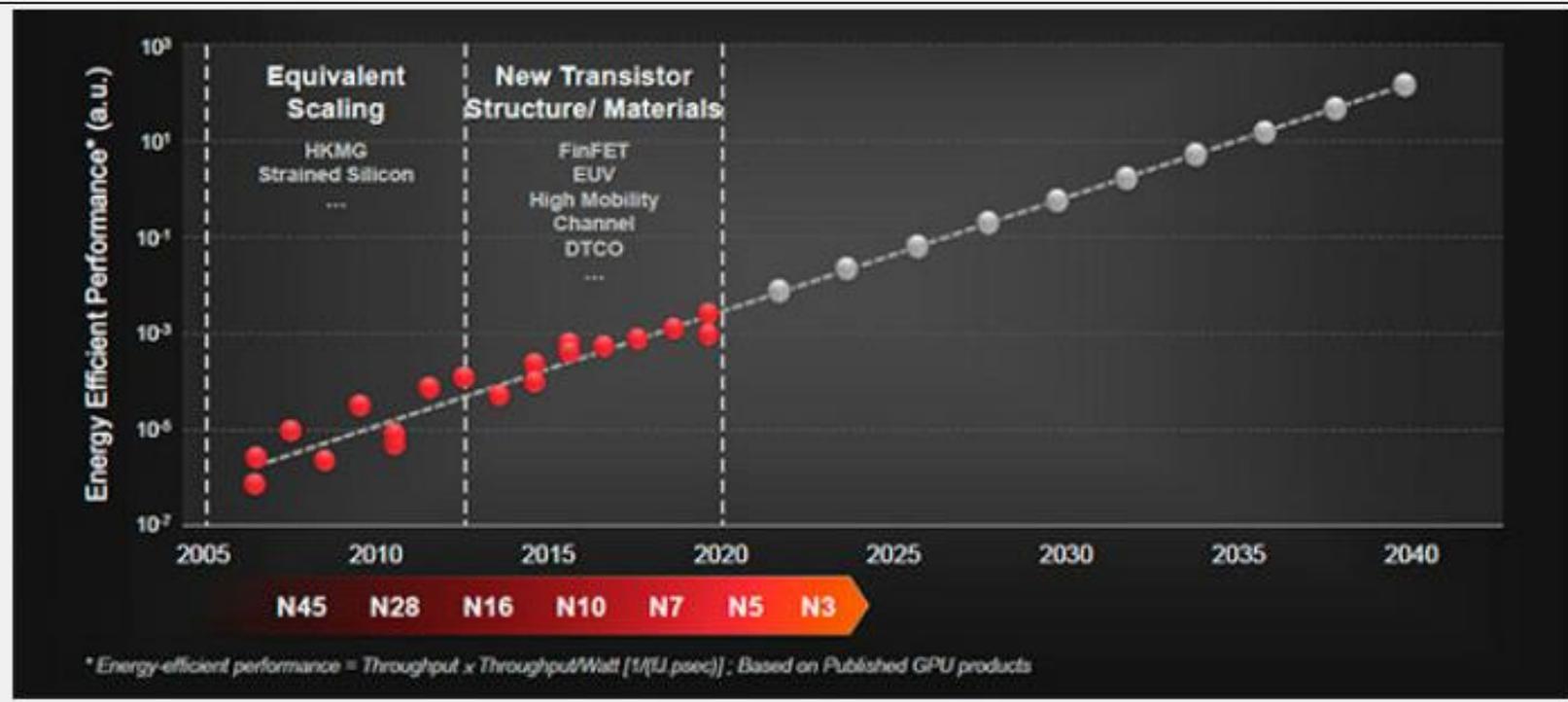
出典：廣瀬圭一「デジタル社会を支えるICTシステムとその省エネ化の動向」日本機械学会誌2022年3月号特集記事

(3) 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1) - IT機器の消費電力の現状と将来予測, 国研 科学技術振興機構 低炭素社会戦略センター, 平成31年3月.

(4) 国際エネルギー機関 (IEA) WEBサイト、Key energy statistics, <https://www.iea.org/countries/japan> (参照日 2021年1月10日)

# 1-3. 信号処理に必要な消費エネルギー低減の歴史

CMOSをベースとするマイクロプロセッサの**信号処理に必要な消費エネルギーは、この10年間で、2桁減少**している。同様な研究開発が、微細化技術、光回路、積層技術等で行われていることを考えると、**情報関連の消費エネルギーは、とてつもなく大きくなることはないのではないかと推測**される。



[図11] GPUのエネルギー効率性能(スループット×スループット/消費電力)の過去の推移と今後の予測

注) N45などの呼称はTSMCにおける微細化技術ノード (nm) を意味する。

### 2-1. 技術ロードマップの検討対象の移り変わり (フォアキャストの視点の追求)

日本機械学会技術ロードマップ委員会が活動を開始した2006年頃に、企業の皆さんに言われたことは、アカデミアが技術の将来を予測出来ないようであれば、また、技術の将来を議論出来ないようであれば、学会活動は必要ないのではないかという厳しい指摘であった。それならば、**学会を挙げて技術の将来予測に挑戦し、曖昧さを伴う議論を嫌う傾向が強いものの、技術の将来を議論しようではないかという思いを共有して、日本機械学会の技術ロードマップの活動がスタートした経緯がある。**

■ 最初に検討対象にした**技術の将来動向は、時代と共に、常に性能向上を求める技術が数多く存在すること**であった。常に性能が上がり続けるので、**将来をその延長で予測することが出来、現象のメカニズムに関連するキーとなる科学的なパラメーターを見出すことで、将来予測が出来、定量的に議論できる**ことを示すことが出来た。例えば、熱の分野で言えば、物体から熱を除去出来る性能(熱伝達率)、断熱材で熱の損失を防ぐ性能(熱伝導率)、また、繊維材料の強度、発電所の効率、ヒートポンプの性能(COP)などであった。また、**設計分野では、必ず実現しなくてはならないMUST設計、より性能を上げるBETTER設計、そして、付加価値を実現するDELIGHT設計が、3つの座標軸として発展していくという概念**であった。この活動を、**機械工学の多くの学問分野で実施したのが第一段階**であった。

(2007年10月号、日本機械学会誌Vol.110, No.1067付録)

- 次に、**機械工学の多くの学問分野から見た将来像を集めることで、将来の社会がどのようなものになるかを描くことに挑戦**した。日本機械学会の各部門で作成した技術ロードマップ、また、機械工学全体の技術ロードマップなどを集めて、「**技術ロードマップから見る2030年の社会**」を提示し、**今の技術の延長としての技術や社会の将来像を議論した。**  
(2016年5月号、日本機械学会 Vol.118, No.1170)

■ これに対して、本年度日本機械学会誌に掲載されている技術ロードマップ活動は、2016年時点での2030年に対する技術予測の内容を、最近の技術の急速な進展や社会の急激な変化の観点から、レビューという形で見直したものである。これは、**現在から将来を予測するというフォアキャストの視点からみて何が予測出来るかという点では、7年あまりを掛けて突き詰めたもので、より多角的に検討された完成度の高い技術予測である**と言える。

この内容を、皆さんに議論いただき、2030年に向けた技術戦略を各ステークホルダーが立てる際の参考になればと期待される。

## 技術ロードマップの社会課題への挑戦 – バックキャストの視点での検討段階へ –

今回の特集号での検討内容は、将来の社会像を想定し、その社会像を実現するためには技術はどうあるべきかというバックキャストの視点からの検討に重点を置いている点に特徴がある。現在までも、持続可能性や、ものづくりとひとづくりと言う視点での検討は、行われてきているが、**2050年の社会像の創発と実現のための課題、課題解決のための分野統合課題の創出と、2050年の技術ロードマップの策定と言う挑戦に結びついている。**

- この場合に重要な点の一つは、**描いた社会像がより多くの方の共感を得られるか**と言う点である。
- 今回作られた3つの社会像が、他の方々が考える社会像とどのような関係にあるのかを考察し、**社会像の位置づけを明確にしたい**。**社会像 1「人間と自然、都市と地方、個人とコミュニティが長く共存される社会」**は、**「持続可能性」**、**社会像 2「多様性と包摂性が確保された次世代コミュニティによる総合地域社会」**は、**「多様性と包摂性」**、**社会像 3「リアルとバーチャルの調和に基づく個人価値尊重と社会サステナビリティの融合社会」**を、**「リアルとバーチャルの調和」**と端的に考える。

- 他に考えられている社会像の例として、**国連のSDGsの17の社会課題**、また、NEDO、タイ、経団連などが提案する**「サーキュラーエコノミ」、「バイオエコノミ」、「サステナブルエネルギー」**の3つの技術の方向性も社会像の一つと考えられる。
- 次のスライドに、本特集で取り上げる社会像と他に考えられている社会像の関係を示すが、**本特集の3つの社会像は、おおむね多くの社会像の内容を包含している**と言えよう。
- 具体的には、**SDGsの17課題は、社会像1「持続可能性」、および、社会像2「多様性・包摂性」に関するものと理解出来る**。また、日本の科学技術・イノベーション基本計画では、**社会像3「リアルとバーチャルの調和」**に関して、**第5期・第6期で、「Society5.0」が取り上げられている**。また、経団連、NEDO、タイ政府の発信する将来動向で取り上げられている、**「サーキュラーエコノミ」・「バイオエコノミ」および、「サステナブルエネルギー」の推進の概念も、社会像1，社会像2で理解できる**と考えられる。



■ JSMEの提案する社会像と、ほかで検討されている社会課題との関係整理をすると、提案している**3つの社会像は、おおむね多くの社会像の内容を包含している**と言えよう

社会課題	SDGs (国連、17課題)	科学技術・イノベーション基本計画(日本政府)	経団連、NEDO、タイ政府の社会の方向性指針
1 持続可能性	貧困、飢餓、保健、水・衛生、エネルギー、イノベーション、生産・消費、気候変動	グリーンイノベーション (第3期)	サーキュラーエコノミ、サステナブルエネルギー
2 多様性・包摂性	教育、ジェンダー、成長・雇用、不平等、都市、海洋資源、陸上資源、平和、実施手段	ライフイノベーション(第3期)、Market Pullな研究開発(第4期)、Well Being(第6期)	バイオエコノミ
3 リアルとバーチャルの調和		Society 5.0(第5期)	

- 日本機械学会の技術ロードマップも、多くの方々の真摯な活動に基づき、**フォアキャスト的な視点をとことん追求し、一方、それと連携・補強する形で、バックキャスト的な視点での策定の段階を迎えつつある。**
- **将来を予測し、議論して戦略を立てるといふ、極めて重要な活動をする上での基本**であり、日本の研究者が世界を牽引し、世界で存在感を出す上での必須なプロセスであると思われ、この**検討内容が広く活用されることを期待したい。**

## ■ 3-1. 温度に基づく熱のカスケード利用の推進の歴史と展望

3-1-1. **熱サイクルの高性能化を実現**（ヒートポンプおよび発電サイクルの高効率化と、暖房・給湯の化石燃料燃焼利用からヒートポンプ利用への転換）

3-1-2. **高温域へのヒートポンプ技術展開とプロジェクト創成**  
（ボイラー代替用途**高温出力ヒートポンプ**の研究開発と産業利用**高温域の小温度差加熱**への展開）

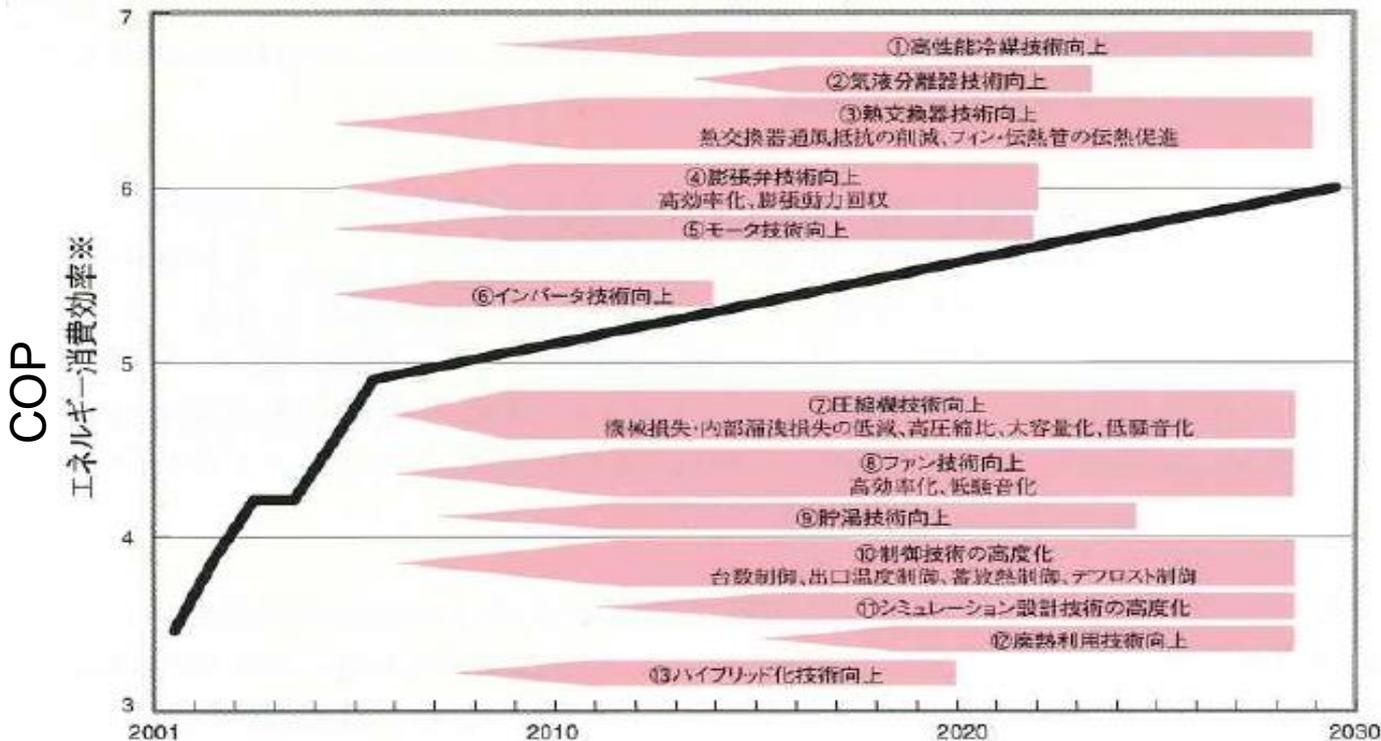
## ■ 3-2. **SDGs ロードマップへの展開**

## 給湯用ヒートポンプの性能向上の歴史

給湯用ヒートポンプ(エコ・キュート) は、CO<sub>2</sub>を熱媒体として、日本が世界に先駆けて開発。(電中研と東電、機器メーカーが、効率の高いロレンツサイクル化に適している点に着目して開発した)

社会・技術ニーズ

<ul style="list-style-type: none"> <li>・寒冷地対応</li> <li>・静音化</li> <li>・貯湯式高効率化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・給湯分野のCO<sub>2</sub>削減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ハイブリッド式(ボイラ)</li> <li>・業務用貯湯式中型機</li> <li>・融雪用給湯機</li> <li>・コンパクト化(貯湯槽一体型)</li> <li>・直接給湯式</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・廃熱利用型給湯機</li> <li>・大容量化</li> <li>・ハイブリッド式(太陽・地中熱)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ダブルバンドル給湯機</li> <li>・極寒冷地対応</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・排気熱回収式小型局所給湯機</li> <li>・給湯廃熱回収(残湯・排水)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水熱源小型直接給湯式</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・産業用大型機</li> <li>・(ヒューズ仕極)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超小型・高効率化</li> <li>・蒸気生成ヒートポンプ</li> </ul>
--	--	---	--	--	--	---	--	--



日本機械学会誌、Vol.110, No.1067 Oct. 2007 JSME技術ロードマップ

## ■ 高性能ヒートポンプサイクルの実現（非共沸混合媒体利用3段圧縮式給湯用ビル用ヒートポンプ）

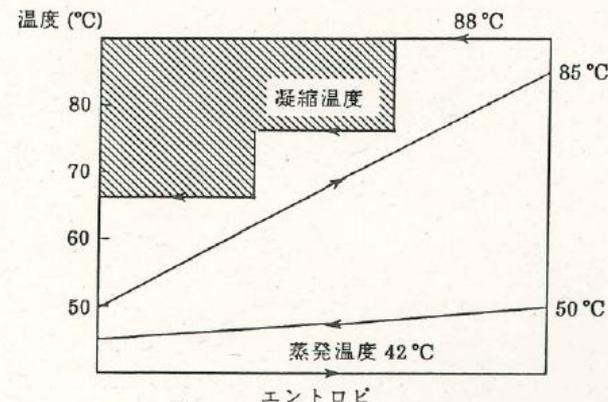
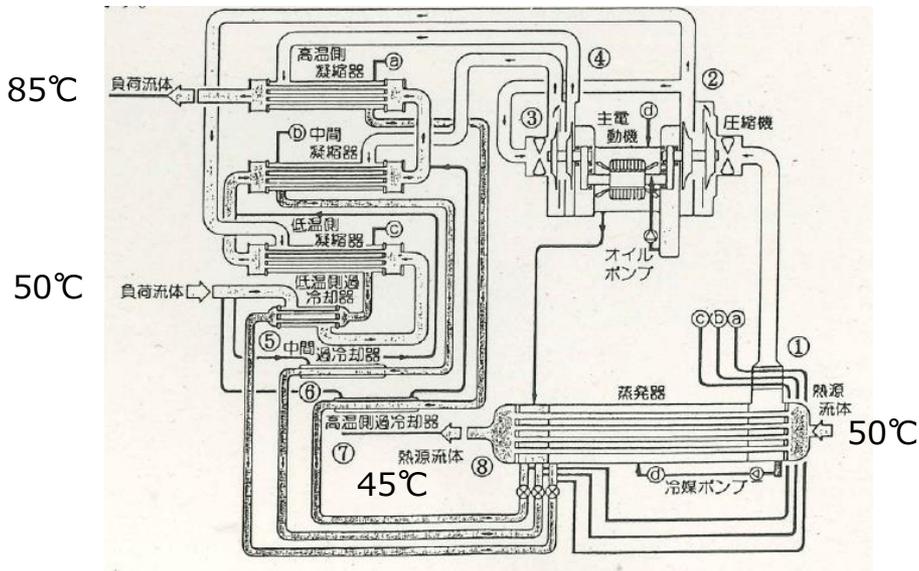


図3-(1)-①-2 サイクル線図

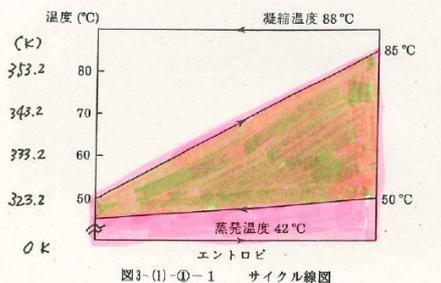
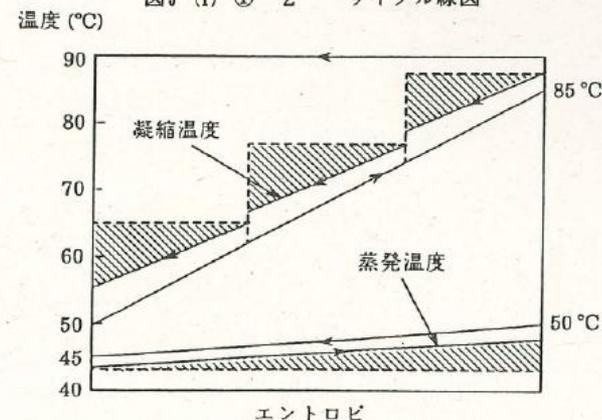


図3-(1)-①-1 サイクル線図

排熱50°C入り口 出口45°C  
 温水50°C入り口 出口85°C  
 理想COP（ロレンツサイクル）=17.2

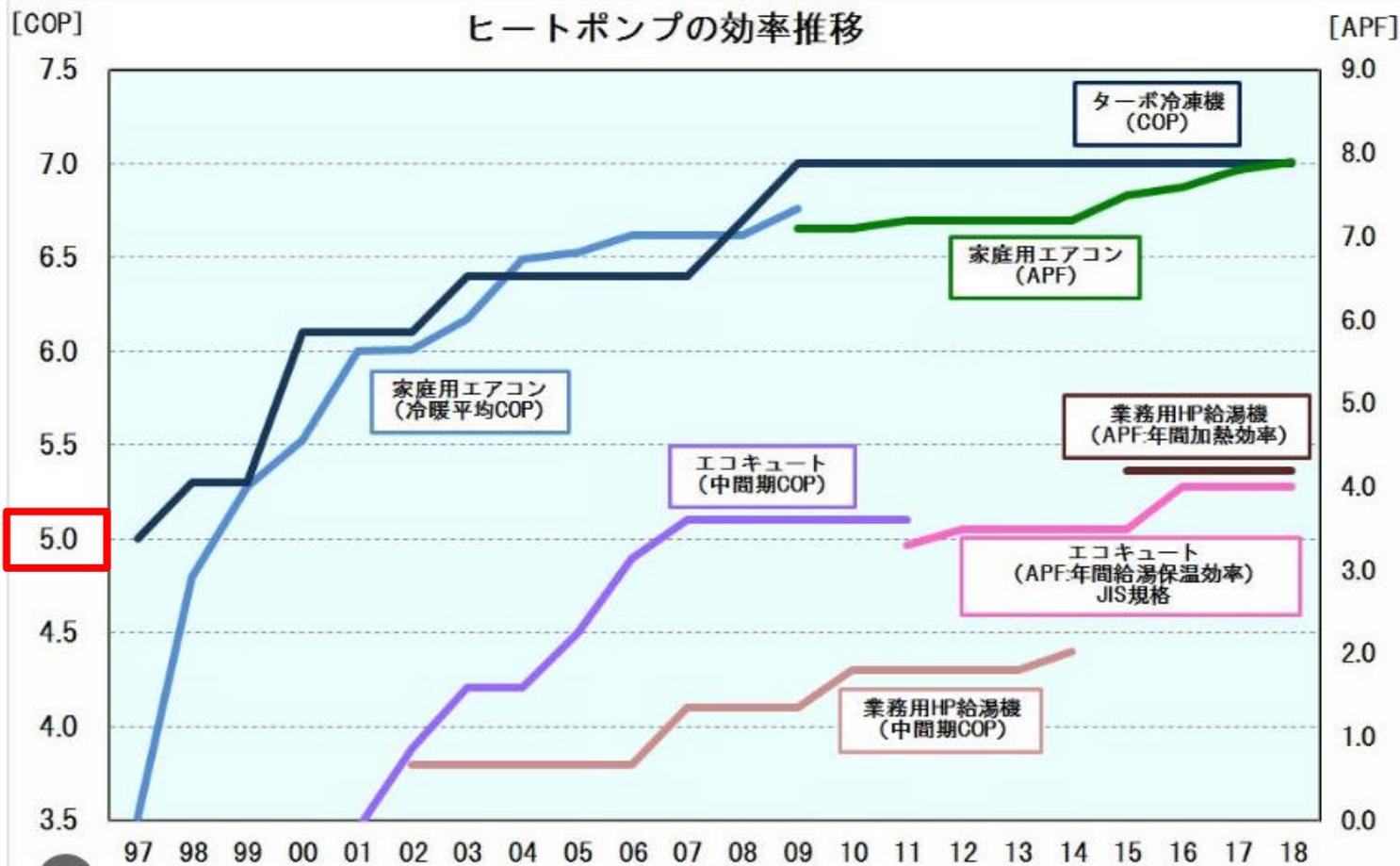
蒸発温度42°C、凝縮温度88°Cの  
 理想逆カルノーサイクル効率=7.85

実現したCOP=8.1

(1993年 スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム研究開発最終評価報告書)

上図におけるハッチング部分の面積が、圧縮動力低減に結びついた

- 圧縮式ヒートポンプによる暖房を考えた場合、COP（成績係数）が5程度以上にまで向上したので、発電効率を40%に仮定しても、化石燃料の発熱量の2倍以上の熱量を供給できる。（50%以上の省エネ）
- 暖房・冷房・給湯は、化石燃料を直接燃焼させる方式から、電気を経由する時代に。（寒冷地用ヒートポンプの性能向上は、現在も研究開発課題）



エコキュート (17℃→65℃)

ターボ冷凍機 (32℃→7℃) 理想COP=11

出典：ヒートポンプ・蓄熱センター  
出典元：メーカーカタログ・省エネ性能カタログ

ヒートポンプの適用先	国内のCO2排出削減効果	技術開発課題
【業務・家庭分野】ヒートポンプ給湯器(エコキュート)	9百万トン (家庭用、1%削減に相当) 1.4百万トン(業務用) 【2030年温対計画】	
【業務・家庭分野】 <b>ヒートポンプ暖冷房</b>	給湯を含め民生用熱需要は約5割 (一次エネルギー供給量の約6%)を占める 世界の冷房：4.4億トン	<ul style="list-style-type: none"> <li>世界の都市の多くを占める<b>寒冷地適用</b>(欧州・米国・日本では北海道)：霜取り付きで高性能、あるいは、低コストな地中熱利用など</li> <li><b>電気自動車の暖房需要対応</b></li> </ul>
【産業分野】産業用ヒートポンプ	2百万トン 【2030年温対計画】	<ul style="list-style-type: none"> <li>種々の分野への適用</li> </ul>
【産業分野】 <b>ボイラー代替 &amp; 高温域の産業ヒートポンプ</b>	化学工業のボイラー代替のみで、22百万トンのポテンシャル	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>直接燃焼を上回るCOP3以上のボイラーを代替できる高温高性能ヒートポンプの開発</b></li> </ul>
【産業分野】 <b>化学プロセスのヒートポンプを用いた電化</b>	ナフサ熱分解炉の電化で21百万トンのポテンシャル	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>多段連続蒸留塔の機能を代替する小温度差多段ヒートポンプ、200℃を超える高温域への適用を含む</b></li> </ul>
【電力ネットワーク用】 <b>デマンドレスポンス対応高速出力制御可能なヒートポンプ</b>	DR等による国内CO2削減ポテンシャル最大値は、シミュレーション解析結果より0.5億トン【NEDO総合指針増補版】	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>数分程度以下の高速の出力制御可能な長寿命の冷暖房用ヒートポンプシステムの開発</b></li> </ul>

- **技術ロードマップをベースとした新たなプロジェクトへの提案の例**
- 産業用の熱需要  
160℃程度以上の熱需要：  
塗装乾燥、化学工業
- ボイラー代替のためには、性能指数であるCOPが3以上となることは必要（ $3 \times 0.45 = 1.35$  約1.4倍）
- 未利用熱エネルギーである60℃排熱から、160℃への昇温プロセスの逆カルノー効率、4.3であり、3以上のCOPを目指すのは、挑戦的な課題である

## ヒートポンプの高温出力化（技術ロードマップ的視点）

- ・50℃から80℃程度までの出力を可能にした**エコキュートの成功**

COPが高くなり得る（炭酸ガスの超臨界サイクルを活用することにより、**ロレンツサイクル化**出来、カルノーの逆効率より高い値が可能になる）

- ・産業用である程度効率の高いヒートポンプは、2012年当時、120℃出力程度まで実現していた

100℃程度までの高効率化：企業に対する補助

130℃程度までの高効率型の実現：NEDOプロ

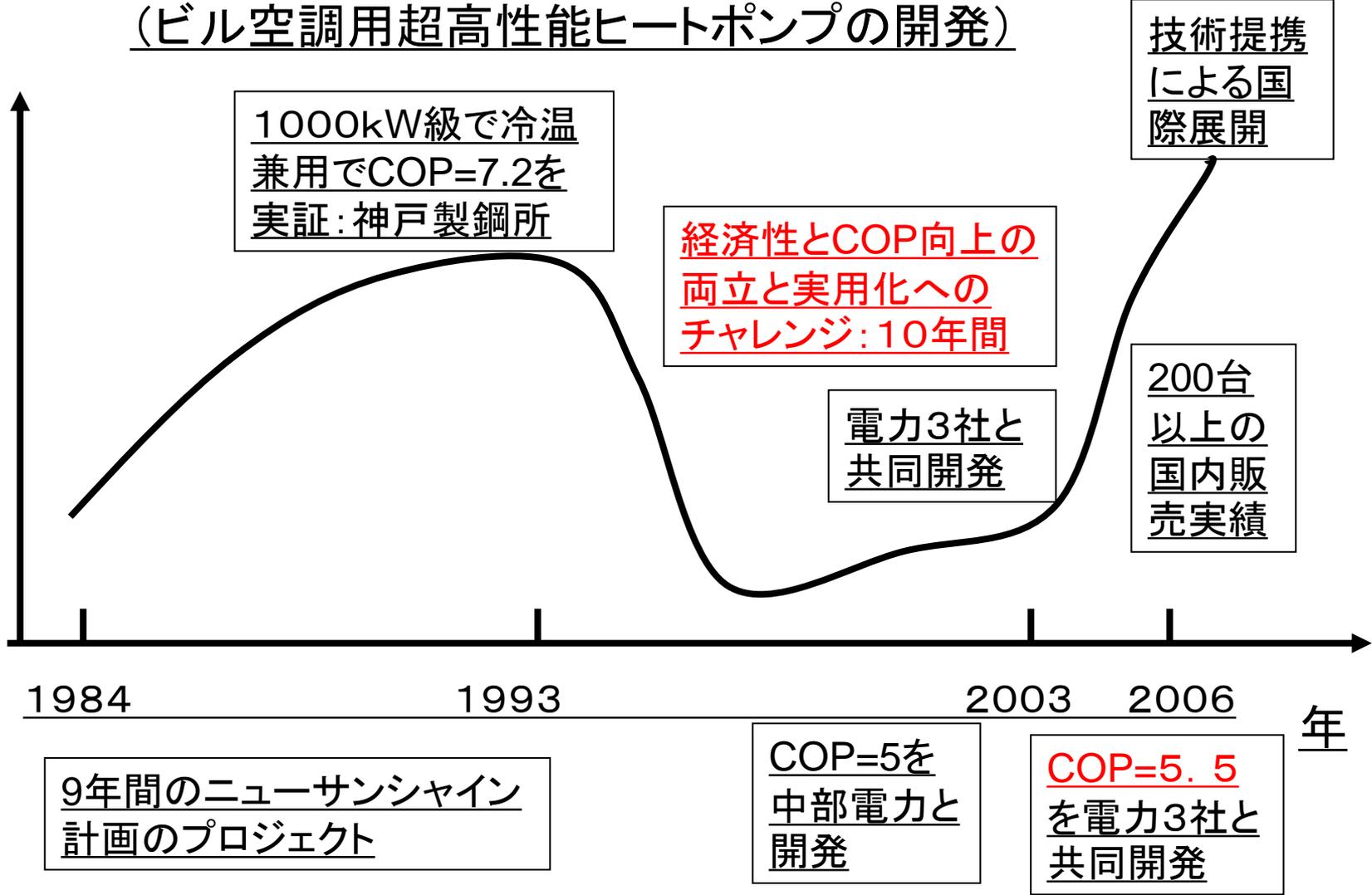
- ・**160℃程度を越える高効率型への挑戦**（=ボイラー機能の代替が可能になる）：**カーボンニュートラルに対応**できる



スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム研究開発の場合

(ビル空調用超高性能ヒートポンプの開発)

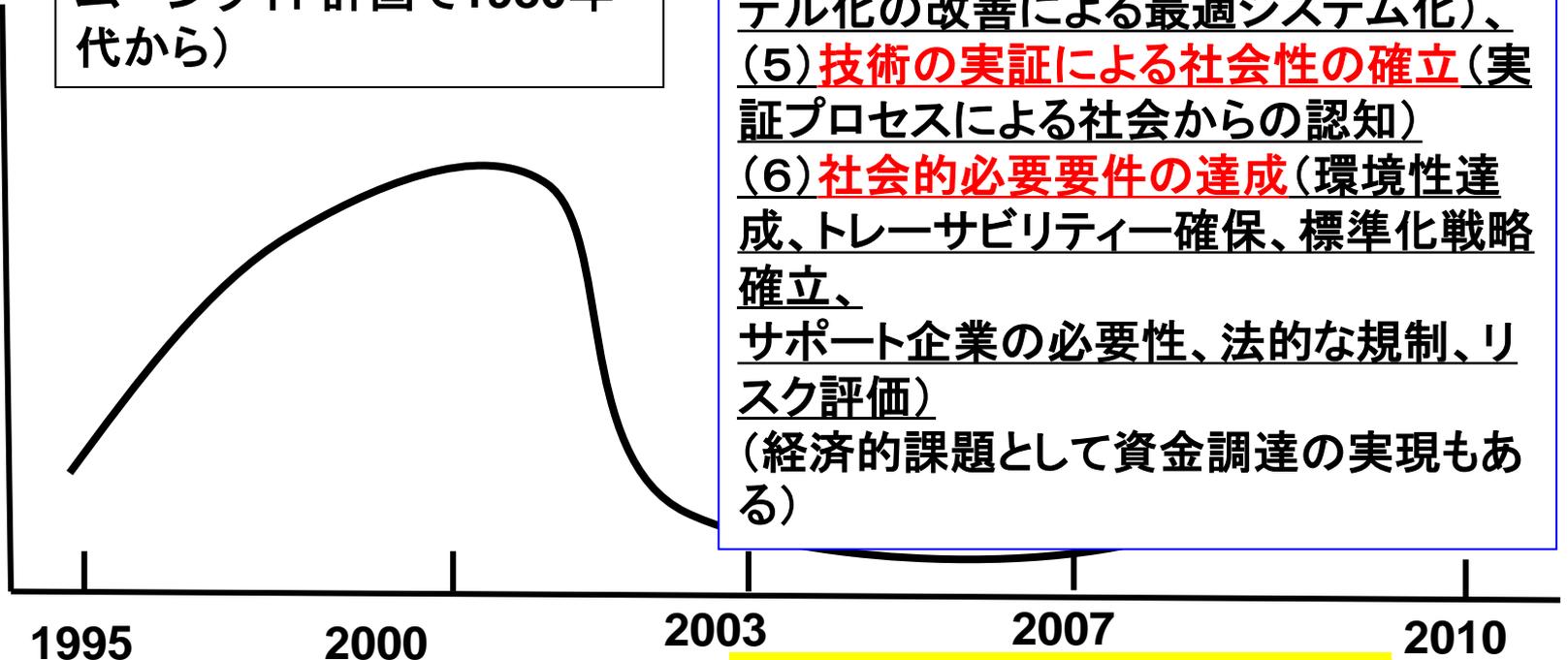
実用化製品数・人々の注目度



## 技術開発における死の谷を越えるために克服すべき技術的課題

多くのエネルギー有効利用技術が研究開発され実証されてきているが、なかなか実用化まで実現できない（ニューサンシャイン計画、ムーンライト計画で1980年代から）

実用化製品数・産業界の関心



- (1) 技術の適用分野の明確化 (技術シーズと技術ニーズのマッチング確立)、
- (2) 経済性の確立 (製造コストの低減)、
- (3) 信頼性・耐久性確立 (製造ラインへの投入必要要件)、
- (4) 高性能化・既存技術との差別化 (モデル化の改善による最適システム化)、
- (5) 技術の実証による社会性の確立 (実証プロセスによる社会からの認知)
- (6) 社会的必要要件の達成 (環境性達成、トレーサビリティ確保、標準化戦略確立、サポート企業の必要性、法的な規制、リスク評価)  
(経済的課題として資金調達の実現もある)

「社会技術」としての確立

## 日本機械学会が主導する理由

- ・**オールジャパンの英知を結集**することが必須  
ニーズを把握し、現在までの技術ノウハウ等を蓄積する**産業界**

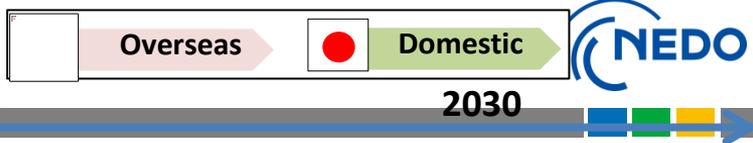
逆カルノー効率を上回る高効率を実現するロレンツサイクル化の手法について、アイデアを出せ、理論的に検討できる**学会のメンバー**

産学官連携の基に、プリコンペティティブな検討を行う体制を構築

検討過程で発生する知的財産権は、学会が所有することを前提

**研究協力部会のRDの制度を初めて活用した  
NEDOプロとして実現し、成功裏に終了した**

# 3. 2 A Roadmap for Clean Energy



2018

2022

2026

2030

## 7.1 Overseas expansion

【**Clean Energy Global Network (CEGN)**: improvement of access to clean energy】

- 1) Clean energy carrier and system simulation
- 2) **Economic efficiency**, Global expansion

**Vision**  
increase of the transported amount of clean energy

## 7.2 Expansion of renewable energy

【**"Chisan-Chisho" energy system**: local production for local consumption】

- 1) Expansion of renewable energy (**solar and wind power**) as infrastructure
- 2) Synergy effects with **disaster prevention/poverty** etc.
- 1) Utilization of **regional resources (biomass and heat etc.)**
- 2) **Economic efficiency, energy networks**

the amount of renewable energy: **22-24%** in 2030

Biowastes Utilization system with Fuel Cell can bring about development of local communities in Mekong Delta.  
(Source:JST(SATREPS))



aiming to limit global warming to within **2°C**, as in the Paris Agreement

## 7.3 Energy saving

【**Energy/IoT technologies**: realization of Society 5.0】

- 1) Establishment/diffusion of **smart meters**
- 2) Utilization of data using IoT, **Energy management**

【**Top Runner**: expansion of energy efficiency】

Expand the **concepts** & provide **technology**

**Energy saving labeling program**  
Retail stores attach the Uniform Energy Saving labels so that consumers can easily choose.  
(Source:ANRE)



**17% energy saving** in 2030 (compared with 2015)





## 4. 技術開発の歴史から見た重要な視点のまとめ

- 1. **「熱に係る機能をいかに発揮させるか」の視点**は重要である。  
「より多くの熱を除去したい」・「熱をなるべく逃がさない」・「発熱量の増大する電子機器を冷却したい」などの機能面から推進する。
- 2. **技術ロードマップと社会課題への挑戦**
  - 2-1. 技術ロードマップの検討対象の移り変わり  
(フォアキャストの視点の追求)  
丁寧な見直しにより完成度の高い技術予測になる
  - 2-2. 技術ロードマップと社会課題への挑戦  
(バックキャストの視点での検討段階へ)  
検討する社会課題が、ほかで検討されている社会課題を包含していることは重要
- 3. **技術ロードマップの活用の歴史と展望**
  - 3-1. 温度に基づく熱のカスケード利用の推進の歴史に活かされている
  - 3-2. SDGs ロードマップへの展開も重要