

学振：未来開拓研究プロジェクトの展開

Development of the Project in “Research for the Future Program” by the JSPS

塩 路 昌 宏*

Masahiro Shioji

1. まえがき

産業革命以降、エネルギーの大量消費による工業化が進められ、快適な生活を確立しそれを支えるための様々な産業の創成・発展が図られてきた。しかし、そのために主要エネルギー源である化石燃料資源の枯渇と燃焼に起因する環境汚染の問題が顕在化し、来世紀に向けて新しいエネルギーシステムの提案と実現が急務となっている。このような社会的背景に基づいて、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業における理工部会に「エネルギー利用の高効率化と環境影響低減化」の分野（研究推進委員会委員長；西川緯一大阪工業大学学長）が設定された。そこでは、エネルギーの高効率有効利用の手段について個別技術およびシステム化技術の立場から研究を進め、それらを通じてエネルギー利用に伴う地球環境への負荷・影響を低減化することを狙いとし、表1のプロジェクト研究が選定されている。

ここでは、そのうちの水素製造・利用技術に関する研究プロジェクトの狙いと概要を紹介し、今後の研究・開発の課題および目標について述べる。

2. 水素製造・利用に関する研究プロジェクトの狙い

周知のように、水素は水を原料とする2次エネルギーであり、リサイクル使用ができるという大きな特長を持つ。また、各種エネルギー資源からの変換と多くの合成燃料への誘導が容易であることから、水素の直接利用だけでなく水素を媒介としたエネルギー貯留および省エネルギー化が可能となり、大幅なエネルギー有効利用が期待できる。さらに、燃焼利用時にCO₂やHCを発生しないため、環境保全につながる動力変換

システムの運用が実現できる。

図1は、これら水素エネルギーシステム導入の背景と特徴をまとめたもので、水素を2次エネルギーとして利用した場合には各種エネルギーの直接利用に比べて融通性が図れるうえ、水素の製造にエクセルギー回収や排熱を有効利用できる可能性があり、利用効率の飛躍的向上が期待できる。すなわち、水素をエネルギーキャリアとすることによって総合的にエネルギーの有効利用を図るコンセプトが重要であり、水素を製造するために有用な電力・熱をわざわざ費やすような状況では、逆に利用効率は悪化するので水素エネルギーシステムの導入は難しい。

水素のもつ優れた資質は以前から注目されており、ボルシェ計画、ユーロケベック計画、ハイソーラー計画など水素をエネルギー利用の軸とする大型プロジェクトが国内外で多く計画・実施されてきた。とくに、水力あるいは太陽光、太陽熱発電を基礎とする水電解水素製造とその効率的利用に関して特色ある構想が多く提案されたが、いずれも実用化には至っていない。現在は、我が国に於いて水素利用国際エネルギーネットワークシステム技術（WE-NET）および広域エネルギー利用ネットワークシステム（エコ・エネルギー都市システム）のプロジェクトが進行しており、水素発生から貯蔵、輸送、利用の各段階における要素技術開発の調査・設計および従来技術の改良研究が進められている。

このような状況の中で、本プロジェクトでは水素を利用するトータルシステムの導入を想定し、その実用化を図るための鍵となる水素製造・利用に関する技術開発を目指す。とくに、大学における基礎研究の視点から、水素の特質を最大限に活用する研究に焦点を絞ること、対象とする現象の機構解明を試み、理論の構築および基礎学理の確立を目指すこと、さらには得られた知見に基づいて実用化評価の立場から限界を見定め、指針を示すこと、などが特長であり、改良型研究

* 京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻教授

〒606-8501 京都市左京区吉田本町

表1 学振未来開拓「エネルギー・環境」分野に設定された研究プロジェクト

プロジェクト名	プロジェクトリーダー（所属）
[平成9年度発足] 水素エネルギー社会を目指す水素製造・利用技術 環境負荷低減のための熱エネルギーの貯蔵に関する基礎研究 超伝導技術の適用による電力系統の高性能化に関する基礎研究 環境負荷低減を目的とした新しい自律分散型都市エネルギーシステム	塩路 昌宏（京都大学） 斎藤 彬夫（東京工業大学） 仁田 亘三（東京大学） 辻 毅一郎（大阪大学）
[平成10年度発足] 低環境負荷型高品位輸送用燃料の合成	山田 宗慶（東北大学）

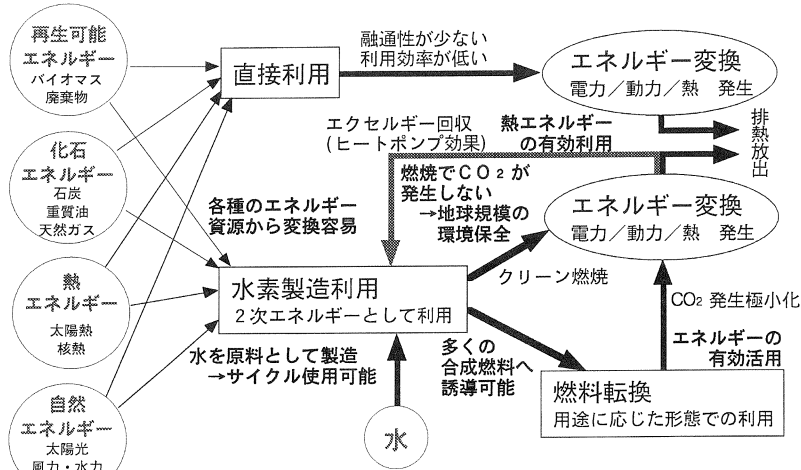


図1 水素エネルギーシステム導入の背景と特徴

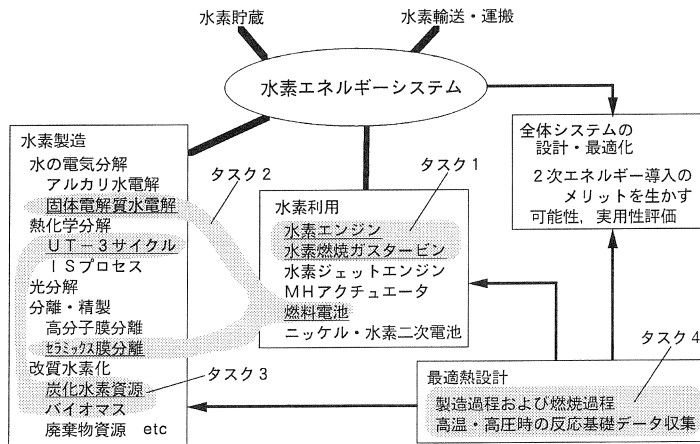


図2 水素製造・利用に関わるプロジェクト研究の対象

ではなくブレイクスルー技術の開発を狙っている。

3. プロジェクトのタスク構成および分担研究課題

本研究プロジェクトでは、21世紀の高度環境保全型社会を構築するための水素エネルギーシステムの実用

化に資することを目的とし、これまでの技術革新の成果と問題点を見極めるとともに、それらと異なった発想に基づく新技術の萌芽を目指している。

この立場から、エネルギー利用の高効率化と環境影響低減化の目的に対して現実的解決法を提示すると考えられる要素技術・応用技術を提案し、それらの開発

表2 研究組織と分担研究課題

	研究者（所属）	分担研究課題
タスク1	塩路昌宏*，石山拓二（京都大学） 三輪 恵（徳島大学）	急速燃焼高性能水素エンジンの開発 ・小規模分散型高性能クリーン動力システムの実用性評価 水素の急速燃焼特性の解明とその制御 ・小形高速エンジンの適用と高効率化 燃焼，動力性能および排気特性の実機調査 水素エンジン内燃焼のエクセルギー解析 ・Zクランクおよびダブルアクティング方式の新機構エンジンの開発
タスク2	八尾 健*，内本喜晴（京都大学）	高温水蒸気電解および水素分離・精製に関する新技術 ・高性能電解セルの開発と大規模集積化 耐熱性ペロブスカイト型関連構造酸化物固体電解質の開発 混合導電性酸化物および高イオン導電性セラミックス電極の開発 ・セラミック分離薄膜による水素高純度化 水溶液からのセラミック合成反応の開発 プロトン導電性セラミック分離薄膜の開発
タスク3	堤 敦司*，菊池隆司（東京大学） 千葉忠俊（北海道大学） 諸岡成治（九州大学） 亀山秀雄（東京農工大学）	熱化学エネルギー変換水素製造プロセスの開発と高性能化 ・熱化学水分解U-T-3サイクルの実用性評価 断熱型充填層反応器による熱効率の向上 腐食性雰囲気下での水素，酸素および水蒸気の高速無機分離膜の開発 one-loop flowのシミュレーションによるプロセスの最適操作条件の検討 ・炭化水素改質サイクルの確立と最適設計 石炭およびバイオマスの急速熱分解による揮発分生成の加速化と高速改質 ・化学・熱エネルギー変換プロセスの最適設計
タスク4	越 光男*，手崎 衆（東京大学） 城戸裕之（九州大学）	水素混合気の高温反応物性および乱流燃焼特性の解明と熱システム設計 ・高温，高圧状態での反応物性データの獲得と反応機構の解明 連鎖停止反応（H+O ₂ +M）に対する第三体効果の実験的解明 レーザー分光・質量分析法および衝撃波管反射波利用計測 COおよび炭化水素燃料の着火誘導時間測定および添加物効果の解明 ・着火反応機構及び燃焼制御法の提案と燃焼システムにおける実証実験 ・実用燃焼場における乱流燃焼モデルの構築

*；プロジェクトリーダーおよびコアメンバー

と新展開を図るための事項に焦点を絞っている。すなわち、水素製造・利用に関わる対象について、図2に示す4つのタスクを設定し、それぞれ連携を語りつつ分担して研究を実施している。表2にプロジェクトの組織およびメンバー構成を示す。

4. プロジェクトの概要

上記の各タスクにおける分担研究はいずれも最適システム構築の基礎となるものと考えており、とくに水素がエネルギーキャリアとして理想的な特質をもつことを生かし、これを媒体とすることによって図3のよ

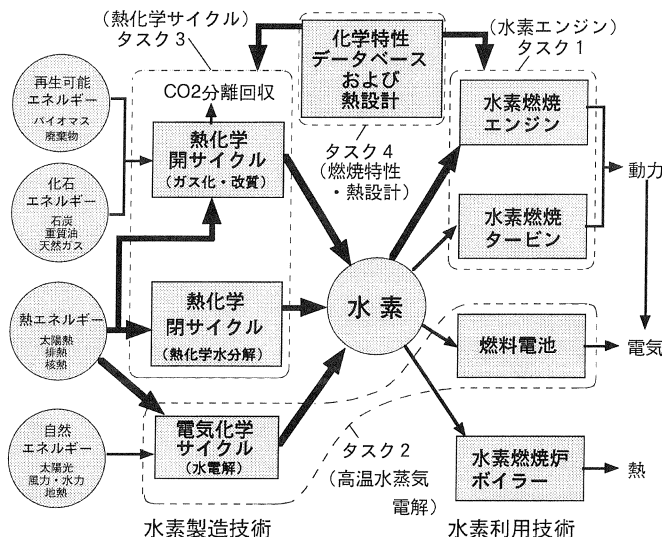


図3 水素を媒介とする熱エネルギー利用のコンセプト

うに熱エネルギーを最大限効率よく利用するシステムを提案している。以下に、個々のタスクの目的、特徴、これまでの成果、等の概略を紹介する。

4.1 急速燃焼高性能水素エンジンの開発

水素の効率的利用の観点からHC・CO₂フリー急速燃焼特性を積極的に利用できる小規模分散型高性能動力変換システムとしての水素エンジンの実用化を目指す。図4は、本タスクの特徴と狙いをまとめたもので、これまでの大規模・集積化の指向に対する需要サイトにおける効率的動力発生と同時に大気汚染物質の無発生を意図し、そのためのエンジン技術の要件、方法および可能性を示す。

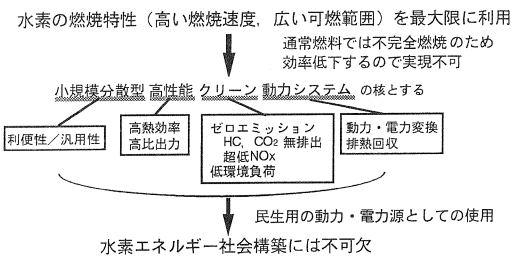


図4 高速水素エンジン開発の特徴と狙い

これまでに、水素の急速燃焼特性の解明とその制御の指針を示すとともに、短行程高速エンジンへの適用を提案し、基本特性について実機による調査を実施した。高速エンジンの試みは、急速膨張に伴う温度上昇抑制作用によって異常燃焼を防ぐとともに出力低下を

補完し、併せて超希薄燃焼および高圧縮比化による高効率化を狙ったものであり、実験と理論の両面から高速水素エンジンの実用性を確認し、将来の可能性について検討している。さらに、水素の特徴的な燃焼特性を最大限に活用し、動力性能を飛躍的に高めるため、菱形リンククランクおよびダブルアクティング方式の新機構エンジンの開発を試みている。

4.2 高温水蒸気電解および水素分離・精製

水素エネルギー社会成立の前提となる水素製造に關し、余剰電力を利用する電気分解の効率向上を図る。ここでは、高温水蒸気を利用して必要電気量の極小化と分極の抑制効果を示し、そのためのセラミック材料および水素分離・精製に関する新技術の開発を行う。

これまで、高温水蒸気電解の実用化のための耐熱性高性能カソードとして、CeO₂をドープしたYSZ（イットリア安定化ジルコニア）のサーメット電極がn-型混合導電性による高い活性を示すこと、新規に合成した立方晶ペロブスカイト型構造のセラミック電解質が広い温度範囲で高い酸化物導電率を有することなど、電解セルの開発とその大規模集積化について多くの知見が得られ、電力-水素変換の高効率化・高密度化の可能性が拓けた。さらに、水素の高純度化のためのプロトン導電性セラミック分離薄膜の開発を試み、フルオロ錯体の加水分解反応による水溶液からのセラミックス合成に成功し、これにより水素分離・精製速度を飛躍的に高める方策が示された。

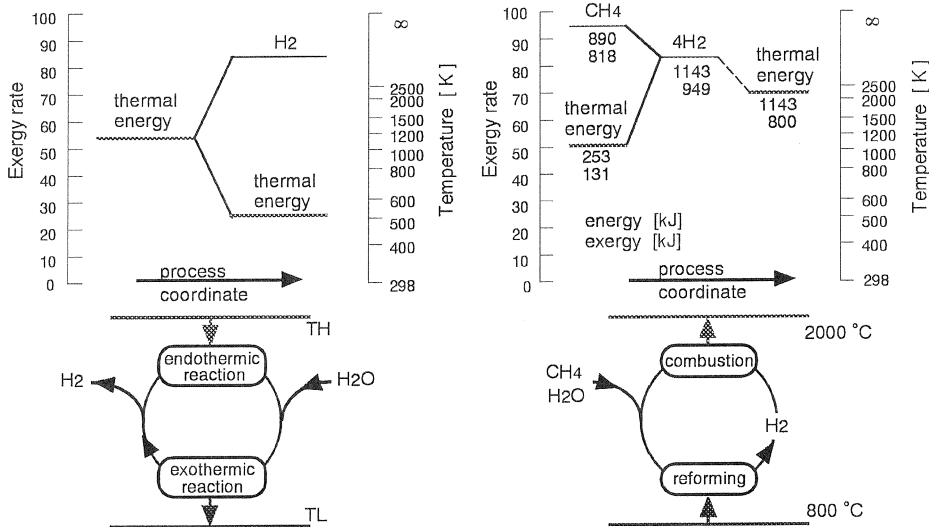


図5 熱化学エネルギー変換ダイアグラム

4.3 熱化学エネルギー変換水素製造プロセス

クリーンでかつ実用規模の発生量が期待できる固体電解質水分解、熱化学水分解および炭化水素資源の改質について新技術の提案と応用・発展・実用化を図る。これには、熱エネルギーのみを使って水から水素を製造する方法（熱化学閉サイクル）と、熱エネルギーとともに他の化学エネルギーを使って水素を製造する方法（熱化学開サイクル）の2つがある。図5はそれぞれの過程のエネルギー変換ダイヤグラムを示したもので、(a)は太陽熱、核熱、燃焼機器排熱、等の中温レベルの熱エネルギーを使って水を水素と酸素に分解する化学熱機関として動作し、(b)はメタン改質反応の場合を例として、化学エネルギーと熱エネルギーから水素エネルギーに変換する一種のケミカルヒートポンプの機能を持つ。ここでは、これら2つの立場から熱エネルギーを利用して水素を製造する化学・熱エネルギー変換サイクルの確立と高性能化を目指している。

まず、前者では熱化学水分解UT-3サイクルの実用化のために、三相アルコキシド法により反応性に優れたカルシウム系固体反応物ならびに鉄系ペレットの製造とペレット調製法を確立し、従来の粉末合成法と比較して大幅に反応性を向上させることによって連続水素製造実験の見通しを得た。今後、断熱型充填層反応器による熱効率の向上、高性能水素無機分離膜の開発、反応物の構造制御とともに、水素連続製造試験を実施し、one-loop flowサイクルのシミュレーションによりプロセスの最適設計・最適操作条件を示す。さらに、後者の熱化学開サイクルに対しては、バイオマスと低品位石炭を主な対象として急速熱分解による揮発分生成の加速化と高速改質を試みており、高速昇温が可能な高圧熱天秤反応装置を開発し、褐炭が3-4分以内に100%改質ガス化が可能であることを見出した。併せて、ガス化燃焼再生プロセスの設計と最適化を行っており、これらを既存の発電・産業プロセスに組み込むことにより大幅なエクセルギー効率の向上、エネルギー高度有効利用を実現するための方策が示される。

4.4 水素混合気の高温反応物性および乱流燃焼特性

水素製造・利用技術の開発には基礎となる高温・高圧反応物性および乱流燃焼特性に関するデータベースの構築が必要であり、そこで得られた新しい反応機構および反応速度に関する知見に基づき、水素エネルギー変換過程の最適反応経路設計の指針を示す。

まず、水素燃焼を記述する高圧場の詳細素反応モデ

ルの構築に必要な反応素過程の速度定数を実験と量子化学計算により評価し、爆発限界付近の燃焼特性値に対しては、反応 $H+O_2+M=HO_2+M$ の速度定数の感度が極めて高いこと、水蒸気が多く含まれているような系ではこの反応の第三体効果を理解することが重要であることが示された。これらにより構築した反応機構を用いて衝撃波管実験による着火誘導期データのシミュレーションを行い、高圧場における燃焼速度を実験値と比較してその有用性と問題点を明らかにしている。今後、レーザー光分解・質量分析法および衝撃波管の反射波を利用して高温・高圧状態での水素混合気反応機構を実験的に調査し、とくに水素の着火性に重要な HO_2 ラジカルの反応経路について種々の化学種の第三体効果および圧力依存性を明らかにする。併せて、量子化学計算および詳細化学反応理論により速度定数を評価するとともに、新しい着火特性制御法を提案する。また実用上重要な炭化水素/水素混合気の着火特性を解明し、構築した反応機構、及び提案する燃焼制御法を実際のシステムにおいて実証する。さらに、乱流場での水素の燃焼速度を実測し、乱流強度と燃焼速度の関係を調べ、得られた知見を基に乱流燃焼速度の予測モデルを構築してエンジン内の燃焼シミュレータに組み込み、水素エネルギー変換過程の最適反応経路・燃焼設計を行うとともに、エンジン運転条件の最適化を図る。

5. あとがき

以上、日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業において実施している研究プロジェクト「水素エネルギー社会を目指す水素製造・利用技術」について、背景、狙い、タスク構成、内容および成果の概略を紹介した。スタートから既に2年半を経過しており、各タスクともほぼ当初の計画に沿って研究を遂行している。それら成果の一部は本誌において紹介されており、さらに関連分野の会議、シンポジウムでの発表、学協会誌および論文集への公表と併せて、本年度末には成果発表会の開催も計画しているので、内容の詳細についてはそれらをご参照いただきたい。今後は、水素製造・利用技術の実用化に向けてさらに新規の知見を獲得するとともに、プロジェクト研究としての相互の関連性を明確にし、早期の水素エネルギー社会の実現を目指したい。