



第1巻 第9号

東京工業大学 COE-INES

COE-INES原子力水素系国際ワークショップ、THEN、開催報告およびProposal

東京工業大学大学院理工学研究科 原子核工学専攻
COE-INES拠点サブリーダー 加藤之貴

はじめに

燃料電池に代表される水素利用技術が進歩し、水素需要の増大が予想されている。近年、原子力エネルギーを利用した水素製造技術が、二酸化炭素を排出しない水素製造方法として国内外で注目されている。そこで原子力水素の可能性を多角的に検討するため、本ワークショップが平成16(2004)年11月6～7日の二日間で“COE-INES International Workshop on “Toward Hydrogen Economy; What Nuclear can contribute and how” (通称名THEN)と題して東京工業大学 田町キャンパス キャンパスイノベーションセンタービル、913号室にて開催された。外国参加者5名、国内参加者42名、計47名の来訪を頂き、13名の国内外のパネリストからのレクチャーを受けた。このワークショップでは各パネリストに各ご講演の末尾に“Proposal for Hydrogen Economy”を共通テーマに水素社会実現に

向けての提言をお願いした。第2日午後はこの提言群をもとに参加者全員での原子力水素の将来に対する提言作成をテーマとしたフリーディスカッションを行った。フリーディスカッションをもとにコーディネーターによってProposal for Hydrogen Economy Outcomes from COE-INES Workshop THENがまとめられた。以下に開催概要報告および、そのProposalを記す。このワークショップ企画は松井一秋および加藤之貴が担当した。さらにフリーディスカッションの計画、運営にコーディネーターとして、Charles W. Forsberg, Karl Verfondern、福田健三、堀雅夫、田下正宣、松井、加藤が参画した。なお、ワークショップ名は松井の発案によるものである。

末筆ながらこの場をお借りし、この会議開催にあたりご協力頂いたパネリスト、コーディネーター、参加者の皆様に篤く感謝の意を表す。

THEN開催概要

1. 開催の背景:水素は未来を開くか?

最近、燃料電池の普及可能性が高まるに伴い、水素エネルギーへの期待も高まっている。燃料電池市場として自動車分野は最も期待される一つである。自動車向けの利用には固体高分子型燃料電池(PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)が適しており、このPEMFCの開発技術が近年一段と向上し、自動車市場での燃料電池利用に現実性が出てきている。PEMFCは水素を燃料として空気中の酸素と反応させることで発電し、モーターを駆動し動力を発生する。このPEMFCの普及には水素の安価で容易な供給が必須である。しかしながら水素は化石エネルギー等と異なり、一次エネルギーを利用して製造される2次エネルギーである。すなわち水素の製造には何らかのエネルギー源が必要であり、水素はそのエネルギーを保持したエネルギー輸送媒体に過ぎない。水素は酸素と反応しエネルギーを発生し水として排出される、よってその場においてはクリーンであるが、水素を製造する際に化石燃料を利用するとすれば、総合的には二酸化炭素発生を伴うエネルギー媒体となる。よって好環境的でクリーンな水素エネルギーシステムの実現には、二酸化炭素発生を伴わない一次エネルギーを用いた水素製造が望まれる。この点で、再生可能エネルギーと並んで原子力エネルギーに水素製造のエネルギー源としての可能性がある。原子力水素製造は原子力エネルギーの社会貢献として一つの可能性となりえる。

理想的な水素社会の実現には多くの課題がある。そこで本ワークショップは理想の水素経済実現に向けての原子力の役割とその手法を主テーマとして開催された。水素社会の実現に向けての技術課題を抽出し、その解決の道を探ることを主題に複数のパネルセッションを計画した。特にディスカッションに重きを置き、その成果を提言としてまとめることが意図された。

2. ワークショップ内容

全体を5つのパネルセッションに分け、前半4パネルでは各パネリストの講演、最終パネルで水素経済実現に向けての総合討論が行われた。

(1) 第1パネル “Hydrogen Energy System”

座長: 堀雅夫(原子力システム研究懇話会)、パネリスト:Karl Verfondern(ユーリッヒ研究センター、ドイツ)、松井一秋(エネルギー総合工学研究所)、玉浦裕(東工大)、福田健三(エネルギー総工研)

講演では、ヨーロッパにおける原子力水素製造の歴史的経緯をドイツを中心に紹介された。とくにユーリッヒ研究センター、ドイツ、で開発されたメタン/水素をエネルギー輸送媒体とした高温ガス炉利用型の長距離熱輸送システムEVA-ADAMの開発が報告された。あわせて日本原子力研究所の高温ガス炉(高温工学試験研究炉、HTTR: High Temperature engineering Test Reactor)における、原子力エネルギー利用型のメタン改質水素製造の研究事例が報告された。ついで、わが国の2050年までを見越したエネルギー需要構造予測と、原子力および水素の将来的な役割について報告された。化石燃料は長期的には逼迫し、使用量が減らざるをえず、2050年の消費エネルギー媒体のうちの10%を水素が負い、その水素製造の70%は原子力によるものと予測された。また、再生可能エネルギーとして太陽熱を改質反応に利用した

水素製造が紹介され、不安定な自然エネルギーの貯蔵エネルギー媒体としての水素の可能性が示された。この後、わが国の水素経済ロードマップが報告された、燃料電池自動車(FCV: Fuel Cell Vehicle)普及の開発目標として、2030年でFCVが1,500万台、所要水素 $17 \times 10^9 \text{m}^3$ 、水素ステーション8500地点が検討されていた。また、固定式燃料電池として家庭利用のコジェネレーション型燃料電池システムが検討されている。

(2) 第2、3パネル “Hydrogen Production (1) & (2)”

第2パネル座長： 福田健三(エネルギー総工研)、パネリスト：日野竜太郎(日本原子力研究所)、唐澤英年(日立)、田下正宣(エネルギーシシタック株)

第3パネル座長： 加藤之貴(東工大)、パネリスト：小野崎正樹(エネルギー総工研)、疋田知士(日本エネルギー学会(東京ガス))、泉崎幸宏(信州大)

この2つのパネルでは、日本原子力研究所における原子力水素製造プロセス、IS (Iodine-Sulfur) プロセス法が紹介された。高温ガス炉の900℃前後の熱源を利用し、ヨウ素と硫酸を反応媒体として水素が連続的に製造される。2004年6月には世界初の水素製造30NL/h、175時間を成功させた。高温、酸雰囲気耐性のある材料開発、ガス炉との協調的なシステム化について検討がされている。IS法による水素製造の経済性評価が行われ、ISシステムの建設コストの削減が鍵であることが指摘された。

500~600℃域に熱出力を持つ高速炉(FR: Fast Reactor)の水素製造への利用には、膜分離式改質(MR: Membrane Reformer)が有効である。MRは反応を非平衡化し改質温度としては低温のFRの出力温度を利用した改質反応による水素製造が可能である。

再生可能エネルギーは気候に左右され不安定なエネルギー源である。一方で、水素は気体のため利用には圧縮仕事を消費して、圧力容器に注入され、利用されており、輸送性に問題がある。そこで太陽熱などの再生可能エネルギーを用いて石炭やバイオマス燃料をより使い安い液体燃料へ変換して、燃料電池燃料として利用するシステムが提案された。主にメタノールシステム、ジメチルエーテル(DME)システムが検討されている。

製鉄プロセスから生成する水素の燃料電池利用が提案されている。今後の水素需要の増大を考えると、再生可能エネルギーまたは原子力が二酸化炭素排出を伴わない点で可能性を持っている。水素システムの選択においてはライフサイクル基準の効率、環境への影響を考慮すべきであると指摘された。ついで超臨界水の反応性を生かしたバイオマス分解による水素製造の可能性が示され、Ru系触媒が目的に適していることが示された。また、ISプロセスのスケールアップ、高効率化について提案があり、水素分離膜の利用、ヨウ化水素(HI)の直接分解が有効であることが指摘された。水素製造においては、水素の貯蔵、輸送も重要な課題である。また水分解水素製造においては、副生する酸素の有効利用が大事であることが指摘された。

(3) 第4パネル “Toward Hydrogen Economy”

座長： 松井一秋(エネルギー総工研)、パネリスト：大島榮次(高圧ガス保安協会)、Charles W. Forsberg(オークリッジ国立研究所、米国)、堀 雅夫(原子力システム研究懇話会)、加藤之貴(東工大)

ここでは、最初にエネルギーの包括的なビジョンが示された。あるエネルギーが社会で利用される基準は低価格、簡易性、安全性、環境性などがあり、水素も様々な候補の中の一つの選択肢に過ぎない。燃料電池も同じ基準で客観的な評価が必要である。水素は特に、水素製造、充填、配送、貯蔵、輸送などにエネルギーを要するので、包括的な水素利用システムの開発が必要であり、同時に水素社会を想定していない現行法の改定も望まれる。

次にIS法サイクルにおいて膜分離過程を導入することで効率が増大しえる。そこで分離膜の製造、実証事例が報告された。さらに原子力水素の将来展望について述べられた。原子力エネルギーにより水素を製造・貯蔵し、地域ごとに水素を分配し、消費者の場で電気として供給する形が負荷平準化の観点から可能性があると考えられた。また、原子力水素の普及には、エネルギーの将来構想を整え、原子力水素製造技術の向上が重要であると指摘された。最後に原子力をベースとした水素キャリアシステムの紹介があった。原子炉の場で水素が製造された場合、利用側までの貯蔵・輸送が大きなエネルギー損失になる。そこで、燃料改質を基本にし、二酸化炭素化学吸収性能を利用し燃料電池自動車内で水素製造を行う二酸化炭素ゼロエミッション水素システムが提案された。1GWe級原子炉1基で約130万台の燃料電池自動車に水素供給が可能であると推定された。

(4) 第5パネル “Proposal for Hydrogen Economy”

共同座長： Forsberg, Verfondern, 福田, 松井, 加藤

本パネルは、自由討論とし、発表を通しての本ワークショップからの提言を検討した。各パネリストにはProposal for Hydrogen Economyをテーマとしたスライドを準備して頂き、ワークショップの設定課題に対する回答を事前に示して頂いた。これをもとに、下記ピックスを選択した。

- (1) Interface between Nuclear & non-Nuclear
- (2) What are the next steps we need to demonstrate nuclear H₂ production on short term?
- (3) H₂ delivery & storage
- (4) Small local system (with nuclear reactor)
- (5) Large scale system
- (6) Combination options of reactor types and H₂ production methods
- (7) How we can produce economical H₂

これらの7項目について活発な討論がなされた。討論結果をもとにコーディネーターによってProposal for Hydrogen Economy Outcomes from COE-INES Workshop THEN proposalがまとめられた。以下にそのProposalを示す。



写真1 COEワークショップTHENの開催風景

COE-INES Workshop THEN

Yukitaka Kato
Department of Nuclear Engineering,
Tokyo Institute of Technology
COE-INES sub-leader

COE-INES International Workshop on “Toward Hydrogen Economy; What Nuclear can contribute and how” (THEN) organized by the COE-INES, co-chairs of Kazuaki Matsui and Yukitaka Kato, was held on 5 - 6 November, 2004, at Room 913, Campus Innovation Centre, Tamachi Campus, Tokyo Institute of Technology, with participants of 47 persons.

The THEN aimed to discuss hydrogen technologies for hydrogen economy development joining with experts of all fields related on hydrogen system. Hydrogen energy technologies were required to optimize the combination between hydrogen production, hydrogen utilization, and hydrogen market now. The key targets of technology research and development was talked to establish new and practical hydrogen economy. The meeting topics included hydrogen system, nuclear and non-nuclear hydrogen production, hydrogen storage and transportation, fuel-cells, hydrogen energy management, hydrogen economy and all subjects related on hydrogen system.

The workshop consisted of 4 panels by 15 panelists and a comprehensive discussion session organized by the workshop coordinators who were Dr. Forsburg, Dr. Verfondern, Dr. Fukuda, Dr. Hori, Tashimo, Matsui and Kato. Coordinators asked all presenters to show Proposals for Hydrogen Economy in their last slide. All participants discussed “Proposals for Hydrogen Economy” based on the proposals in the comprehensive discussion session. The discussion was categorized in some topics, which were chosen by the coordinators previously. “The Proposal for Hydrogen Economy Outcomes from COE-INES Workshop THEN” in the following was made by the workshop coordinators, integrating the presentations and comprehensive discussions.

On the behalf of COE-INES, the co-chairs thank all of panelists, coordinators and participants for their great contribution on the workshop and proposal. It is our great pleasure if the proposal might give effective suggestion to the development for future hydrogen economy.

Proposal for Hydrogen Economy Outcomes from COE-INES Workshop THEN

There is no doubt about that hydrogen is one of the most preferable in the secondary energy forms together with electricity. It can be produced from various sources such as hydrocarbons of gas, oil and coal, and from water by means of again variety of methods of steam reforming, gasification, electrolysis and thermal decomposition. It can be transferred and stored under pressure. Hydrogen is the best fuel for fuel cell that supplies electricity and heat in very efficient manner. As a matter of fact, hydrogen, electricity and heat are interchangeable.

In the long run, for example at the year of 2100 almost one hundred years later from now, hydrogen can become popular even under very restricted use of hydrocarbon because of global emission control of green house gases. Hydrogen from renewables including nuclear seems a solution for sustainability.

Human's civilization was accelerated by the industrial revolution in the 19th century fueled by coal, and boomed by massive usages of oil and gas in the 20th century. At the last day of the last century, we noticed that further utilization of hydrocarbons as fuel will never be forgiven due to conservations of natural environment and resources. There is no other species on the earth, which is capable to destroy the environment where it is depending on, than human. Hydrogen, electricity and heat from renewables and nuclear with restricted usage of hydrocarbon is a solution for human to live on the earth trying to harmonize with the environment.

Hydrogen economy was said long time, but has not come yet. Still long way to go, we know, but we are learning the way.

1. Development of super effective machine to use hydrogen such as fuel cell
2. Seeking competitive price hydrogen in market, and designing optimum distribution and storage system for hydrogen
3. Developing many possible optional technologies to produce competitive hydrogen including nuclear

For nuclear to play a role in hydrogen economy;

1. Nuclear energy costs be competitive in heat and electricity as first of all
2. Easier construction, operation of the nuclear plant or machine and reasonable related regulation
3. Public understanding and acceptance to the broader application

But those are nothing special for nuclear hydrogen, but for wider application and development of nuclear system itself in the world.

Nuclear thermal heat can be used for thermal and electric decomposition of water and steam reforming of natural gas. Today high temperature gas cooled nuclear reactors are under development and almost commercially available, but more efficient high temperature reactor concepts using liquid-salt-cooling may become possible. Lower temperature thermal water splitting and steam reforming technologies are waiting for further development and demonstration. Variety of technology should be kept for future possibility.

Nuclear to produce hydrogen, and distributed hydrogen to generate electricity are a possible ideal combination for future supply architecture. Stable nuclear operation and intermittent demand of electricity can be matched by stored hydrogen of variable pressure: Harmonization of Hydrogen and Nuclear Energy Systems.

Hydrocarbon such as methane including methanol and other synthetic hydrocarbons can be regarded as source of hydrogen for fuel cell of automobiles and homes, and nuclear can regenerate catalyst for steam reforming. Nuclear and solar heat can add value to hydrocarbon steam reforming and other reactions, which will compose of a synergetic hydrogen production system for co-existence of hydrocarbons, renewables and nuclear.

After two days extensive discussions at the COE-INES international workshop THEN, November 5 and 6, 2004, we have come up the following recommendations to be studied and pursued further.

1. Competitive hydrogen is the very objective of nuclear hydrogen, and there are many ideas and options to utilize nuclear energy to support hydrogen economy, which are to be kept open.
2. Although the R&D options are kept open, some technologies already matured, should be demonstrated and deployed probably in small scale for the start, for the further development to the realization of nuclear hydrogen. A hundred megawatt electric equivalent or less classes reactor might be worthwhile to consider a nuclear hydrogen model with combined heat and power application. The community by hydrogen, electricity and heat is a dream of carbon emission free society.
3. Parallel to the demonstration, in order to take advantage of nuclear characteristics, system development together with hydrogen storage and delivery, should be designed according to the both applications of small and local, and large and central needs and demands.
4. Finally but not the least importance, how to harmonize nuclear and hydrogen systems should be worked on in a sense of interface of both systems including safety issues, and mutual understanding by experts both in hydrogen and nuclear.

Today there are on-going and aggressive R&D programs on Hydrogen in the world, notably in Japan, USA and Europe, and Generation IV initiative which is the international collaborative scheme for developing innovative nuclear systems, pays special attention to nuclear application to produce hydrogen. We believe nuclear hydrogen system as one of the ideal energy, which should be pursued under both international collaboration and competition.



〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 N1-12
原子炉工学研究所内 COE-INES事務局
TEL:03-5734-2966 FAX:03-5734-2962
Email: coe-ines@nr.titech.ac.jp URL:<http://www.nr.titech.ac.jp/coe21/>