

# 水素エネルギーによる建築・住宅の低炭素化

建築研究部環境設備・基準研究室長

足永 靖信



# 水素エネルギーによる建築・住宅の低炭素化

建築研究部環境・設備基準研究室長 足永 靖信

## 1 はじめに

建築・住宅からの二酸化炭素排出量は年々増加の傾向を示している。図1に各部門の二酸化炭素排出量の年変化を示す。1990年と比べ、業務その他部門で50.9%、家庭部門で48.1%の増加(2011年度)が見られる。建築・住宅における二酸化炭素発生量を大幅に削減するには、省エネ化の推進とともに抜本的なエネルギー需給のあり方を見直す必要がある。また、東日本大震災(2011年3月11日)の影響により発生した福島第一原子力発電所事故以降、電力供給の見通しが不透明になっている。世の中の節電意識が高まっている中で、特に、電力システムの動向についても社会的に注目視されている。

国土交通省総合技術開発プロジェクト「低炭素・水素エネルギー活用社会に向けた都市システム技術の開発」(平成21~24年度)では、エネルギー消費時に二酸化炭素が発生しない水素に着目し、現状に比して二酸化炭素排出量50%削減を可能とする都市システムの構築を目的として、水素の安全性、環境性能に関する技術開発に取り組んだ。本稿では、これらの研究成果を紹介するとともに水素システムを建物に導入する際の留意点について述べる。

## 2 総プロ概要

### 2.1 水素エネルギー

水素は質量的には宇宙に最も多く存在する元素である。しかし、水素は酸素と結びついて水の形で安定する性質があるため、地球上ではそのままの形では存在し難い。したがって、天然ガスのように地盤から水素ガスが噴出することはまずない。エネルギーとして見たとき、水素は電気と同じようなものと考えると理解しやすい。水素も電気も石油、石炭など様々な化石燃料から加工される2次エネルギーである。ただし、建物における利用を考えると、水素には一般の系統電力には見られな

い大きな特徴がある。それは、熱を含めた高効率利用が見込めることである。発電所の発電効率は40%程度であり、残りは熱として海水などその場の環境に放出されている。しかし、建物において水素エネルギーを利用して燃料電池による発電を行えば、

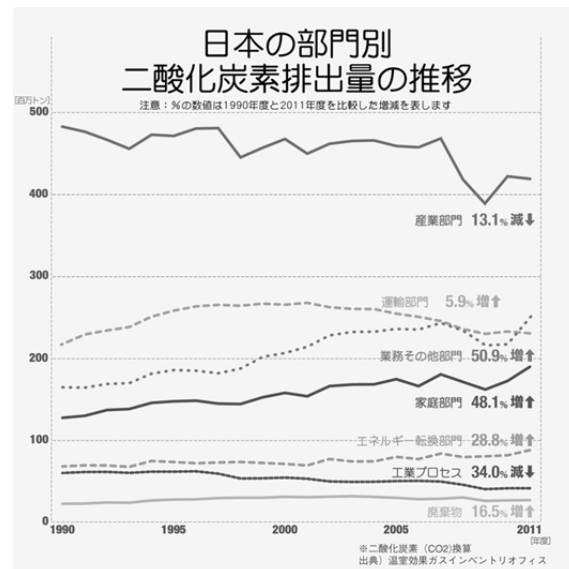


図1 日本の部門別二酸化炭素排出量の推移 (1990-2011年度) 1)

発電ロスの一部を給湯などの熱的用途にそのまま使うことができる。この差はとても大きい。

## 2. 2 水素と建築関連法令

水素供給事業が将来行われるとしたら、水素はガスの一種であるためガス事業法に各種規定が設けられることになる。ガス事業法は経済産業省の管轄である。一方、国土交通省が管轄する建築基準法ではガス配管関連として、壁貫通の不燃材料の関連規定（建築基準法施行令第129条の2の5第1項第7号イ）、建築物の住戸に設けるガスの配管設備の関連規定（建築基準法施行令第129条の2の5第1項第8号、建設省告示第1099号）が存在する。

水素システムを建物に導入する際に、これらの関連規定が障害にならないか、もしくは適切な導入のための技術基準を新たに設ける必要があるかなど検討が必要と考えられる。

## 2. 3 総プロの取り組み

国土交通省総合技術開発プロジェクト「低炭素・水素エネルギー活用社会に向けた都市システム技術の開発」（平成21～24年度）では、エネルギー消費時に二酸化炭素が発生しない水素に着目し、現状に比して二酸化炭素排出量50%削減を可能とする都市システム技術を開発することを目的としている。図2に水素活用社会のイメージを示す。

総プロの内容は大きくは以下の3つに分かれている。本紙ではこれらの研究概要を紹介する。

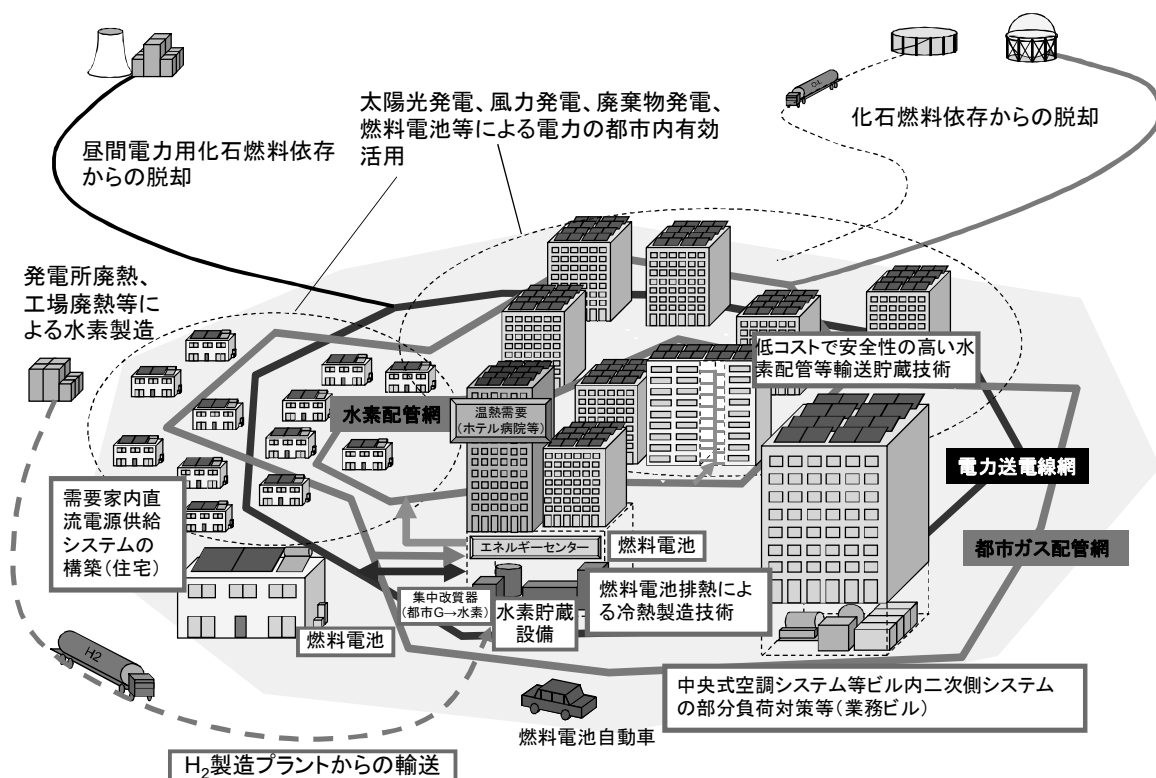


図2 水素活用社会のイメージ

- ①水素配管を敷設した建物等空間の安全性の検討
- ②燃料電池等による建物の低炭素化技術の開発
- ③低炭素都市評価技術の開発

### 3 水素配管を敷設した建物等空間の安全性の検討

#### 3.1 調査範囲

水素配管の安全性に関する調査範囲は大変広範である。そこで、有識者、実務者との協議の上、経済産業省等で検討が進んでいる配管材料の課題はここでは取り扱わず、建築ユーザー側の視点から図3左に示す前提条件を整理し、図3右の内容を計画、実施した。集合住宅やオフィスにおいては縦シャフトなど建物内の空間を水素配管が通過する可能性があるため、漏洩拡散シミュレーションや火災実験を実施する。なお、一戸建ての場合、燃料電池等は家の外に設置することを基本とするので、これらの問題は関係なくなる。

#### 3.2 都市ガス配管の設置状況の調査

ガス漏洩時の拡散性状を検討するに当たって、既存建物の都市ガス配管の設置状況について現地調査を実施した（テナント型事務所ビル5棟、共同住宅5棟）。調査の結果、テナント型事務所ビルの場合、ガス配管はシャフト奥に設置されていてシャフト内に強制換気装置や換気口は設けられていないケースが多いこと、共同住宅の場合、ガス配管は水道、污水配管やメータ類とシャフト内に收容されていて、点検扉の上部、下部に開口部が設けられていることが分かった。

#### 3.3 ガス漏洩時の拡散性状の検討

### 前提条件

- 1.水素漏洩感知器の開発  
都市ガス等と同様に、漏洩・地震・圧力不足等の安全対策を備えた水素用マイコンメータが開発されることを想定
- 2.水素への付臭  
都市ガス等と同様に、臭気による漏洩の検出方法が採用されることを想定
- 3.水素消費設備  
家庭用又はオンサイト型コジェネレーションシステム用の燃料電池を想定(水素コンロ等の水素を直接燃焼させる機器は検討対象から除外)
- 4.都市ガスシステムからの移行  
都市ガスから水素に完全に置き換わる場合を想定(ガス配管からは水素のみが供給され、リスク管理上都市ガスとの共存は考えない)

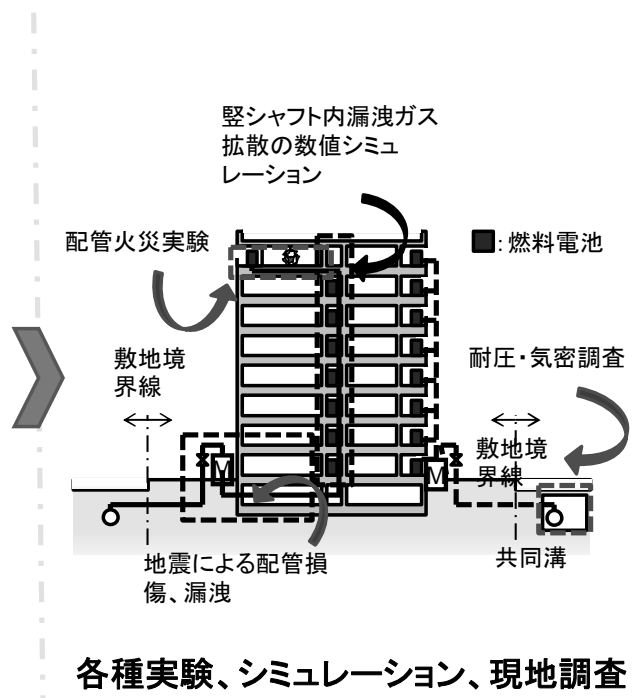


図3 水素配管の安全性に関する調査概要

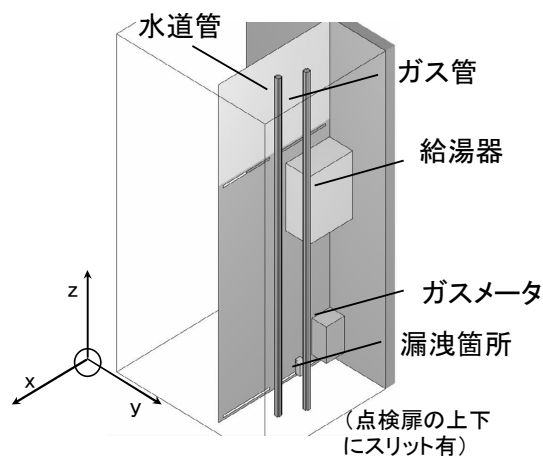
現地調査結果を踏まえ、集合住宅の竖シャフト空間に図4(a)のようなガス管等の設置を考え、ガス配管の下部でガスが漏洩した場合のCFD(数値流体力学)による非定常拡散シミュレーションを実施した。解析には商用ソフトウェアのSTREAMを用いた。計算条件としては、ガス種は都市ガスと水素の2種類、管内圧力は143~2,500Paの3段階、漏出位置は0.4~2.6m高さの3段階の計13ケースの組み合わせを設定した。

計算結果の事例を図4(b)に示す。漏洩した水素はパイプシャフト扉に衝突後上方へ速やかに拡散するのに対して、都市ガスの拡散は緩慢でありほぼ同心円状に分布する。水素は爆発濃度範囲(Vol4%以上)が都市ガスと比較して急速に拡大しており、管内圧力は同一であっても水素ガスの漏洩量は都市ガスのそれより大きく、また浮力の相違も大きく影響する。この結果は、水素センサの応答性が良ければ早期の漏洩検知が可能であることを示唆している。その他、集合住宅の廊下やドライエリアにおける漏洩シミュレーション、集合住宅の廊下における煙による気流可視化実験も実施した(図4(c))。

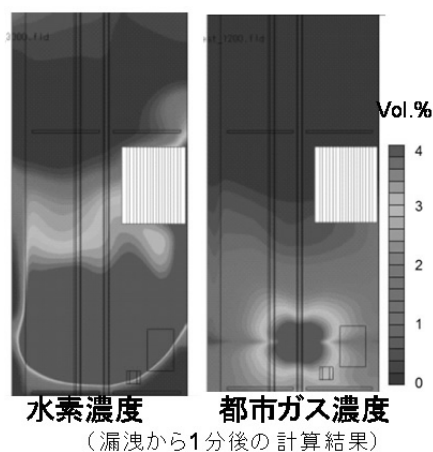
### 3.4 地震による配管等損傷の検討

住宅の基礎を水素ガス配管が貫通する場合や外壁に水素ガス配管を設置する場合を想定し、地盤の揺れが水素配管に及ぼす影響を基礎模型の加振実験により検討する。

基礎模型の寸法は縦横2.9m×1.9mである。基礎模型は、一戸建(基礎根入れ30cm、建物荷重2t/m<sup>2</sup>)、集合住宅(基礎根入れ45cm、建物荷重6t/m<sup>2</sup>)の2種類を考える。基礎模型は、独立行政法人建築研究所の建築基礎・地盤実験棟の大型



(a) 計算対象



(b) 計算結果事例



(c) 可視化実験事例

図4 水素ガスの漏洩に関する検討

せん断土槽（長さ 10m、深さ 5m、幅 3.6m）の中央位置に設置した。基礎模型の配置状況を図 5 a) に示す。図 5 b) に示すように、基礎模型の周辺には、ガス配管、マイコンメータ、各種センサを配置した。地中埋設のガス配管は、PE 管、亜鉛メッキ鋼管の 2 種類、地上部は亜鉛メッキ鋼管とする。大型せん断土槽に、地震時の地盤の振動（加振条件は正弦波、エルセントロ NS 波など 10 種類）を与え、各深度の加速度、土圧、配管のひずみ量等の計測を実施した。配管加速度の計測事例を図 5 c) に示す。

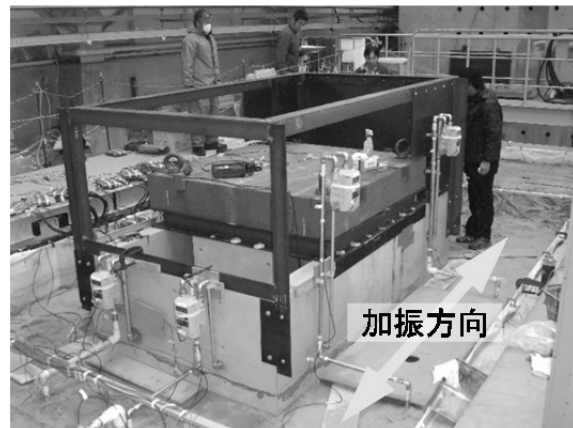
加振実験の結果、10 系統全ての配管内圧力について、圧力の大きさはセンサーの許容誤差範囲内にあり、加振中に配管内のエアが漏れていないこと、各配管の応答加速度の波形には位相がみられず、配管の材質・径に関係なく配管の挙動に顕著な傾向は見られないことなどが分かった。

### 3. 5 既設共同溝を利用した水素供給実証実験

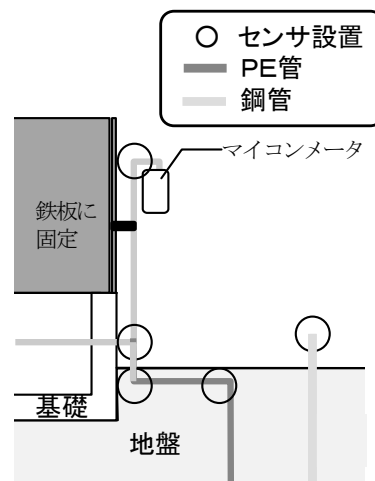
#### 3. 5. 1 都市内水素輸送

燃料電池のセルスタックが必要とするのは水素である。そこで、水素が定置用燃料電池等に直接供給される水素社会の到来を想定して、定置用純水素駆動型燃料電池の開発が先行実施されている（富士電機製 PAFC(105kW)、東芝製 PEFC(30kW) 等）。純水素駆動型であれば改質装置が不要なので、省スペース、省コストになる。加えて、二酸化炭素が発生しない、電力負荷の追随性向上などの特長がある。

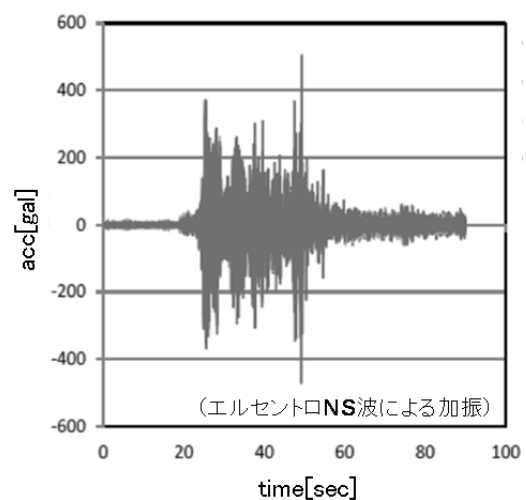
海外では都市間における水素のパイプライン輸送は数多く行われている。



(a) 住宅の基礎模型の外観



(b) 断面構成



(c) 配管加速度計測事例

図 5 水素ガス配管の加振実験

輸送経路は、水素を生成する鉄鋼工場から水素を消費する化学工場までが多い。アメリカにおいては総延長 1,450km、ヨーロッパにおいて総延長 1,500km の実績があり、中・高圧水素を搬送する配管には主に鋼管が用いられている。しかし、個々の需要家への水素輸送の事例はほとんど見られない。

水素を都市内で輸送する方式は大きくは 3 つある。一つ目はガスボンベに水素を収容してトラック等で配送する方式、二つ目は直埋設管に水素を流す方式、三つ目は共同溝内に水素管を敷設して水素を流す方式である。本研究では、三つ目の方式について、実証実験なども実施したのでその概要を報告する。

### 3. 5. 2 つくば市共同溝への水素ガス管の設置

つくば市共同溝の断面を図 6 に示す。図左は市道付帯設備（道路の附属物）であり、集塵管、熱供給用蒸気管、熱供給用還水管が配置されている。図右は、共同溝法上の共同溝であり、電話線、電力線、水道配管が配置されている。

つくば市道の共同溝については、共同溝整備道路の指定を受けて共同溝と他の施設を一体的に整備し、他の施設部分に共同溝法の公益物件以外の物件を道路法 32 条に基づいて占用許可がされている。そのため、水素管の設置についても、道路管理者であるつくば市が技術上、安全上等の観点から問題無いと判断し、道路法の占用許可をすることは可能であると考えられる。

共同溝は道路法で言うところの「道路」であり、建築基準法、消防法の適用はされない。設置技術基準は各公益事業物件の法律による。現在、水素に関する基準は見当たらない。そこで、つくば市共同溝へ水素管を設置するに当たり、国総研がつくば市と水素管の安全性について技術的協議を行い、実証実験計画案を作成することにした。次に、つくば市が開催する共同溝利用者協議会において国総研が実証実験計画案に関

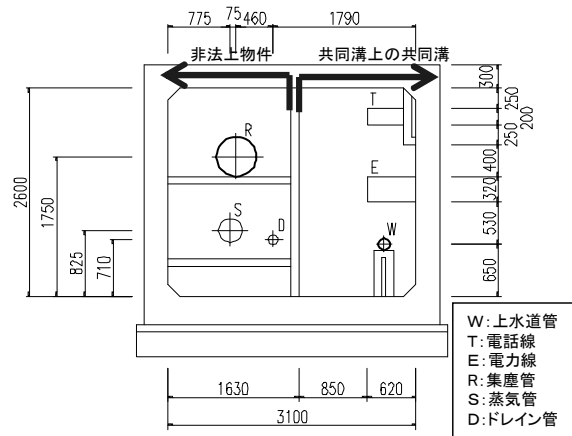


図 6 つくば市共同溝の標準部断面図

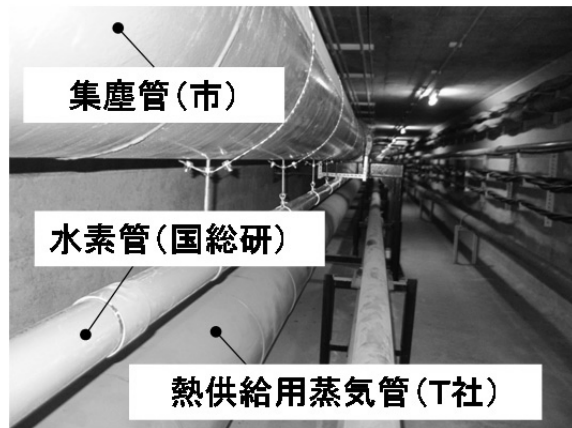


図 7 水素管の設置状況

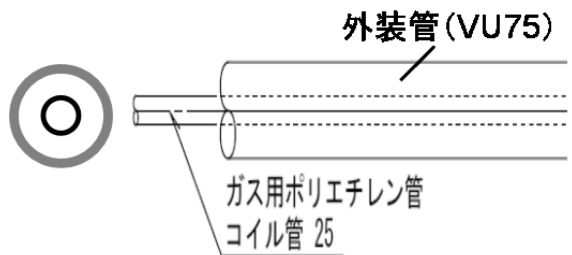


図 8 二重管の材質・構造



する説明を行い、全者の了承を得た。その後、消防、道路課等へ各種の届け出を済ませることにより、市の許可が正式に下り、国総研による共同溝内への水素管の設置を含む実証実験が可能になった。

水素管の設置状況を図7に示す。水素管は、集塵管と熱供給用蒸気管の中間位置に設置した（延長250m）。集塵管を連続的な支持材として活用し、その下部に水素管を帯鉄状バンド（1m間隔）で吊り下げた。

### 3.5.3 水素ガス管の安全性

水素の燃焼範囲は広く、空気に4%～75%混ざると燃焼が可能な気体となる。また、静電気程度のわずかなエネルギーでも水素にそれが加わると着火する性質がある。そのためか、「水素は爆発するから危険である」とイメージされることが多い。しかし、水素は軽くて拡散性が高い気体であるため、現実の開放空間においてこれらの2つの条件が重なることはほとんどないと言われている<sup>2)</sup>。

実証実験において過度の安全性を求めると、結果的にコスト増になり普及の妨げになりかねない。そこで、本研究では、ガス検知式二重管を新たに導入する。そして、共同溝内に隔壁を設けずガス配管を他の管と同室に設置することにより、ガス管の安全性を確保した合理化手法を検討する。

図8に二重管の材質・構造を示す。ガス用管と外装管による二重構造となっている。ガス用管に用いるポリエチレン管は低圧レベルであれば水素脆性の問題はないことが室内実験より明らかにされている<sup>3)</sup>。外装管は万一の漏洩時に水素供給用配管の占有空間を共同溝内空間と区分する役割を担っており、実質防爆処理と見なすことができる。外装管の材質は、軽量で施工性が高く耐久性に優れた硬質塩化ビニル管を採用した。また、外装管にはチーズが設けられており、ガス検知センサをガス用管と外装管の隙間空間に設置することにより、万一のガス漏洩時にガスの搬送を停止する仕組みとする。

### 3.5.4 実験概要

つくば市共同溝における水素供給実証実験の概要を図9に示す。試験対象区間はつくば中央公園に近接する歩行者専用道路である。地下共同溝の特殊部「C4-4」（公園南

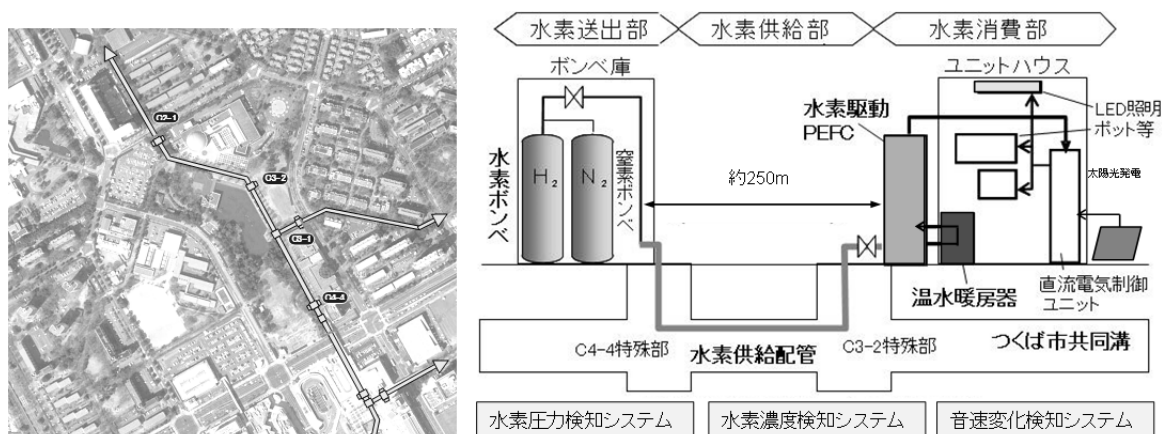


図9 つくば市共同溝における水素供給実証実験

側) から特殊部「C3-1」を經由して特殊部「C3-2」(公園中央部) までの約 250m 区間の共同溝内に水素配管を敷設する。ボンベ庫、ユニットハウスをそれぞれ地上に設置し、水素ボンベから地下共同溝を經由してユニットハウスに水素を供給する。

実験期間は 2012 年 12 月 17～19 日の 3 日間である。水素の挙動は、水素圧力検知、水素濃度検知、音速変化検知の 3 つの方法で常時モニター監視を行った。異常時を想定し、警報発生やメール自動送信、外装管強制排出などの機能も備えている。

共同溝内の水素配管から供給される水素をユニットハウス (5,600×2,346) における発電に使用した。水素配管の取り出しについては共同溝の通気抗を活用し、ユニットハウスの屋外に設置した純水素駆動型燃料電池(発電能力: 1kW、寸法: 1,200×540×1,085) に水素配管を接続した。また、ユニットハウスの周辺には太陽光パネル(単結晶セル構造、定格 1,140W、パネル面積 7.7 m<sup>2</sup> (寸法: 1,580×808×6 枚)) も設置した。実証実験の実施項目は以下の通りである。

#### 1) 各種検知システムの作動確認

- ・水素圧力、流量の検知器の作動及び警報発生
- ・水素濃度検知器の作動及び警報発生
- ・外装管内の伝達音波の検知器の作動及び解析処理

#### 2) 水素配管システムの性能

- ・耐圧・気密性試験(ヘリウム及び水素を使用)
- ・緊急時を想定した外装管内空気の強制排出実験
- ・燃料電池の間断使用時の水素管の圧力、流量変動
- ・水素・窒素の置換時の水素管の圧力、流量変動

#### 3) ユニットハウスにおける燃料電池の作動

- ・太陽光と燃料電池の連携による発電
- ・室内電力負荷変動時の燃料電池の出力特性
- ・天候変動時の燃料電池の追随特性
- ・燃料電池の発電効率の実証

1) 2) の一部について以下に述べる。3) は、4. 3 で説明する。

### 3. 5. 5 水素管の気密性

共同溝内に設置した水素管の気密性試験を実施した。燃料電池の作動に必要な 20kPa 以上の圧力をかけ、管内の流体は水素と比重に近いヘリウムとした。図 10 はヘリウムガスの温度、圧力等の経時変化を表したものである。ゲージ圧は、23～32kPa の値を示している。入口側のガス温度と出口側のガス温度の挙動は異なっている。地上に近い場所で計測されている「入口側のガス温度」は外気温に近い挙動を示すのに対し、出口側のガス温度は共同溝内で計測されているので、地中の熱容量の影響を受けている。

状態方程式を適用し、下式により体積比率を算出し、気密性の検討を行う。

$$V_R = \frac{V_t}{V_0} = \frac{P_0 T_t}{P_t T_0} \quad (1)$$

ここで、P：絶対圧力[kPa]、T：絶対温度[K]、V：体積[m<sup>3</sup>]、添え字の0、tはそれぞれ試験開始時の状態、時間tにおける状態を示す。図11はヘリウムガスの体積比率の経時変化である。体積比率はほぼ1に保たれており、共同構内の水素管においてヘリウムガスの漏洩は見られないことが分かる。

### 3.5.6 水素供給時の水素管内の圧力

太陽光発電との連携を考えると、純水素駆動型燃料電池が瞬時に運転・停止する場合が想定される。そこで、水素配管への物理的負荷の状況を把握することを目的として、燃料電池の稼働による水素配管内の圧力、流量の影響について調べた。水素配管の端部を純水素駆動型燃料電池（PEFC、1kW）に接続し、燃料電池が消費する水素を水素ポンベから補充・供給した。水素送出部ではポンベ庫内の水素配管に流量計、圧力計を設置し、水素消費部ではキャビネット内の水素配管に圧力計を設置した。本実験では流量データ、圧力データを1秒毎に収録した（キャビネット内の計測データは欠損）。

燃料電池の発電量が増加する場合の事例を図12に示す。この場合、燃料電池の発電量は250Wから800Wに増加しており、これを賄うために水素の流量は3ℓ/分から8.5ℓ/分に増加する。このとき圧力は15kPaから13kPaに減少しているが、5分後には14kPaに回復する。消費側から250m離れた供給側の圧力は発電量に対して若干の時間遅れを示している。圧力の性状は安定しており、配管への影響は軽微と考えられる。

以上の結果より、共同溝内において低圧で水素を搬送する場合、水素配管システムに問題は見られない。ただし、今回は実験レベルであるため、事業実施においては、通年の運用、監視等に関わるガス事業者による検討が求められる。

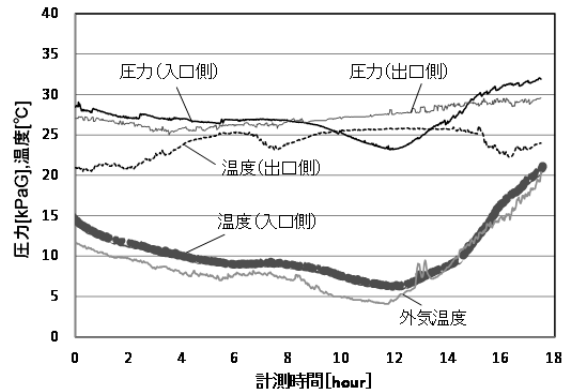


図10 ヘリウムガスの圧力、温度

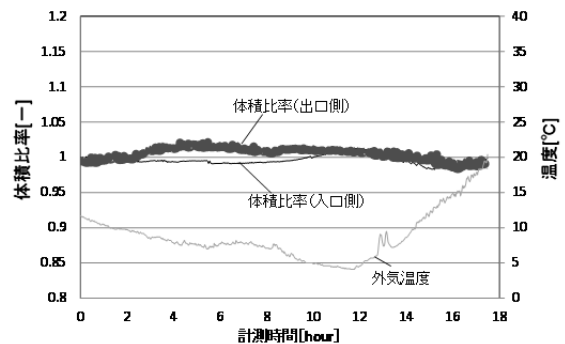


図11 温度変化を考慮して基準化したヘリウムガスの体積比率

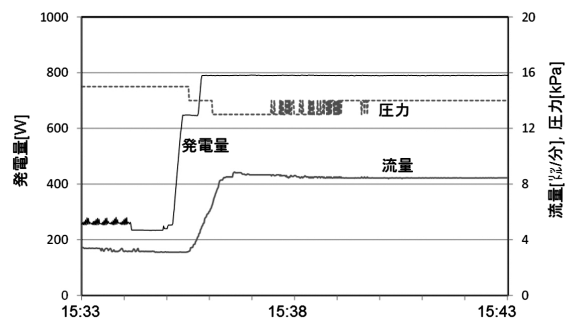


図12 燃料電池運転時の水素ガスの圧力、流量の運転結果

## 4 燃料電池等による建物の低炭素化技術の開発

### 4.1 燃料電池の技術動向調査

燃料電池と排熱利用技術の開発に携わっている技術者、研究者等にアンケートと聞き取り調査を行った。アンケート調査先は、大学、エネルギー関連会社、メーカー、需要家など計 56 件である（回答 34 件）。

アンケート調査結果を表 1 に整理する。市販されている家庭用燃料電池においては、温水（PEFC は約 60℃、SOFC は約 70℃）の形でタンクに貯めている。また、業務用燃料電池（PAFC：100(kW)）の場合は、排熱の利用先に応じて、高温（約 90℃）または中温（約 60℃）のいずれかの形態で回収でき、高温回収の場合、排熱投入型の熱源機器（ジェネリンク）を使用した冷熱製造にも対応可能である。

ただし、蒸気利用は今後の課題になる。将来的な話になるが、純水素型の燃料電池の場合、反応温度が高い SOFC（700～1,000℃）であれば、燃料電池内部での水素改質が不要となり、その分、高温（蒸気）での排熱回収が可能となる。排熱蒸気からの冷熱製造時の機器効率 は 1.3～1.5 であり、夏期においても高効率な排熱利用が期待できる。

### 4.2 燃料電池の省エネ効果（住宅以外）

住宅以外の業務用建築について異なる規模を設定し、各ケースにおいて想定される電力需要及び熱需要をもとに、効率的な稼働が期待される規模の燃料電池を導入した場合の省エネ効果について試算を行った。建物用途は、業務、商業等の 5 種類、床面積は 2,000～50,000m<sup>2</sup> の 5 段階、燃料電池は PEFC、SOFC 等の 4 種類、排熱形態は蒸気、高温水、低温水の 3 種類を設定した。

図 1 3 は計算結果を整理したものである。燃料電池の排熱を使用した場合の省エネ効果は概ね 5～30% の範囲にある。温熱需要が大きなホテルでは燃料電池の排熱形態を選ばないのに対して、冷房需要が大きな業務では、低温

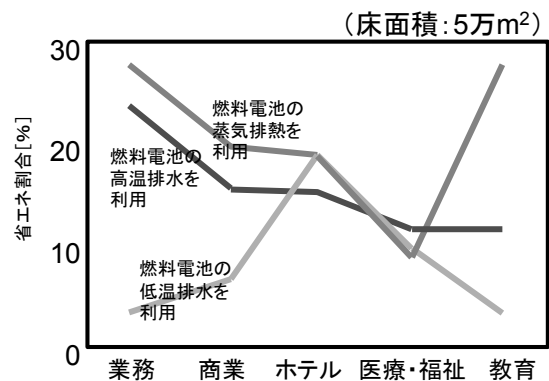


図 1 3 燃料電池の排熱利用による業務用建築の省エネルギー効果

表 1 燃料電池の機器性能

| 型式        | PEFC    | PEFC    | PEFC    | SOFC    | SOFC    | PAFC     |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 燃料        | 都市ガス    | LPガス    | 灯油      | 都市ガス    | LPガス    | 都市ガス     |
| 発電量[kW]   | 0.7     | 0.7     | 8       | 0.7     | 0.7     | 100      |
| 発電効率[%]   | 35～40   | 38      | 36      | 45      | 45      | 42       |
| 排熱回収効率[%] | 45～50   | 50      | 45      | 42      | 42      | 20～49    |
| 排熱形態      | 温水(60℃) | 温水(60℃) | 温水(60℃) | 温水(65℃) | 温水(65℃) | 高温水(90℃) |
| 貯湯槽容量[L]  | 200     | 200     | 200     | 90      | 90      |          |
| 備考        | 市販・家庭用  | 市販・家庭用  | 実証・家庭用  | 市販・家庭用  | 市販・家庭用  | 市販・業務用   |

水の利用はあまり効果的ではないことが分かる。

#### 4. 3 スマート水素ハウス

本研究では、水素パイプラインが都市内に構築された近未来を想定し、水素を利用した「スマート水素ハウス」を提唱している（図14）。スマート水素ハウスに採用されている純水素型の燃料電池は、電力負荷の追随性に優れ、二酸化炭素を一切排出しない特長を有する。

国総研では、つくば市の協力を得て、スマート水素ハウスのモデル実験をつくば市中央公園（中央公園東側ペデストリアンデッキ）に設置したユニットハウスにおいて実施した（2012年12月）。モデル実験では、共同溝から水素を供給して純水素型の燃料電池を実際に作動させた。ユニットハウス内ではDCグリッドを構築し、入力として3系統を考え、太陽光発電を最優先、次いで燃料電池、系統電力とする。室内の電化機器のバス電圧は45Vから50Vの範囲に収まるように制御した。また、太陽電池の変動に対応するバッファとして鉛蓄電池を装備している。室内の負荷装置としては、次の4つの系統を用意した。

- ① 低電圧直流系統(48V, 107W)
- ② 低電圧直流系統(24V, 220W)
- ③ 一般交流系統(100V, 310W)
- ④ 暖房

DC48V、DC24Vの機器については、今回はDC/DCコンバータを用いることにより、市販品で代用した。暖房については、燃料電池の排熱を熱交換機に導いて室内の暖房に活用する。なお、モデル実験は3日間公開で行い、希望参加者は約100名であった。公開実験の様子を図15に示す。

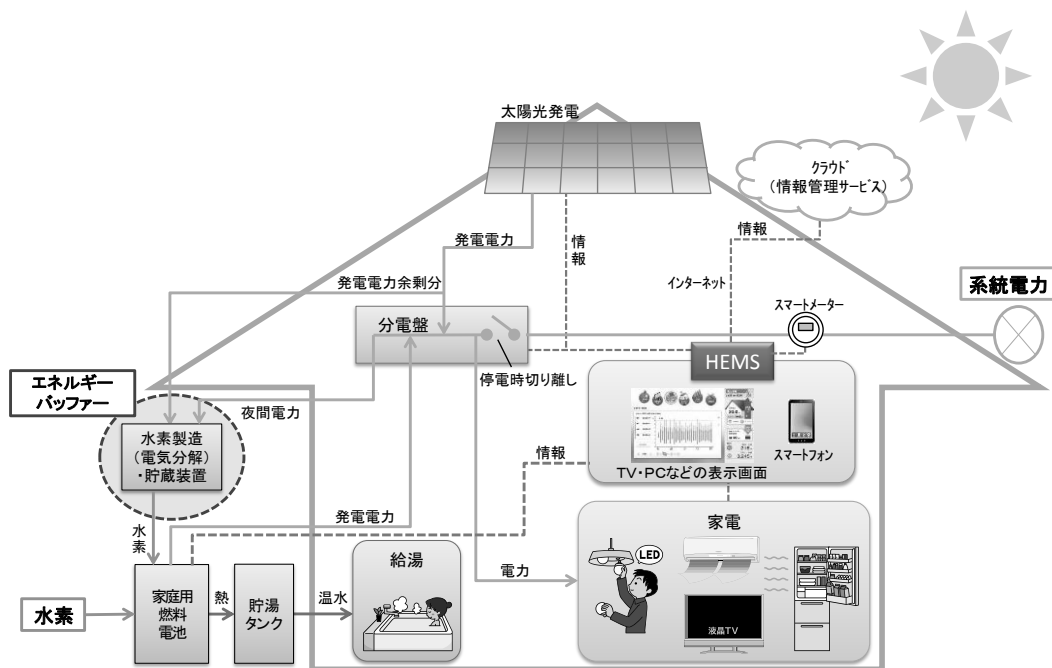


図14 スマート水素ハウス

図16は3日間の太陽電池＋蓄電池、燃料電池、系統電力、室内電力負荷の挙動を示したものである。

12月17日(図16(a))は日射が少なく、「太陽電池＋蓄電池」はほぼ蓄電池の放電で賄われた。図中のAでは、室内電力負荷は、太陽電池＋蓄電池、燃料電池がカバーするため、系統電力への負担は小さい。Bでは蓄電池の放出量が下降し、燃料電池がカバーしきれず、系統電力が増加している。

このように、定格に余裕があっても燃料電池が期待通りに作動しないことがしばしばあり、電極温度の問題が考えられる。通常は燃料電池の2次冷却システムは貯湯タンクに繋がっており、電極温度が発電できないほど冷えることはないが、本実験では貯湯タンクを外して2次冷却ポンプを手動でON/OFFしていた。実験の実施が12月だったこともあり、電極の温度を保つのに苦労したが、これらは二次冷却ポンプの自動制御によって改善可能と考えられる。

12月18日(図16(b))は好天であったため、「太陽電池＋蓄電池」の数値は太陽光発電の寄与が大きい。図中C、Dを見ると「太陽電池＋蓄電池」の挙動に伴って、補完的に燃料電池が作動して室内の電力需要を満たしている。

12月19日(図16(c))では、太陽光発電との連携について以下の検討を行った。図中Eでは、「太陽電池＋蓄電池」のシステムの強制的な遮断が行われた。強制的な遮断直後は系統電力が増加するが、燃料電池の出力増加に伴い、系統電力の消費量は減少し安定した。図中Fでは、太陽光パネルをビニールシートで覆うことにより、太陽電池＋蓄電池の変動を人工的に作り出した。これを補完する形で燃料電池が作動していることが分かる。

本システムは、天候によらず室内の電力負荷に追随し、系統電力への負担も小さい。3日間の系統電力の削減率(発電量に相当)は77～92%であった。



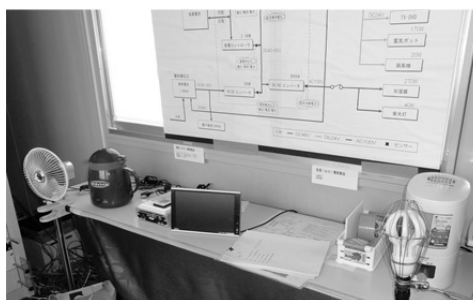
(a) 現場説明

(手前：太陽光パネル、奥：ユニットハウス)



(b) 純水素駆動型燃料電池

(ユニットハウスの屋外に設置)



(c) 直流の電化機器

図15 公開実験の様子

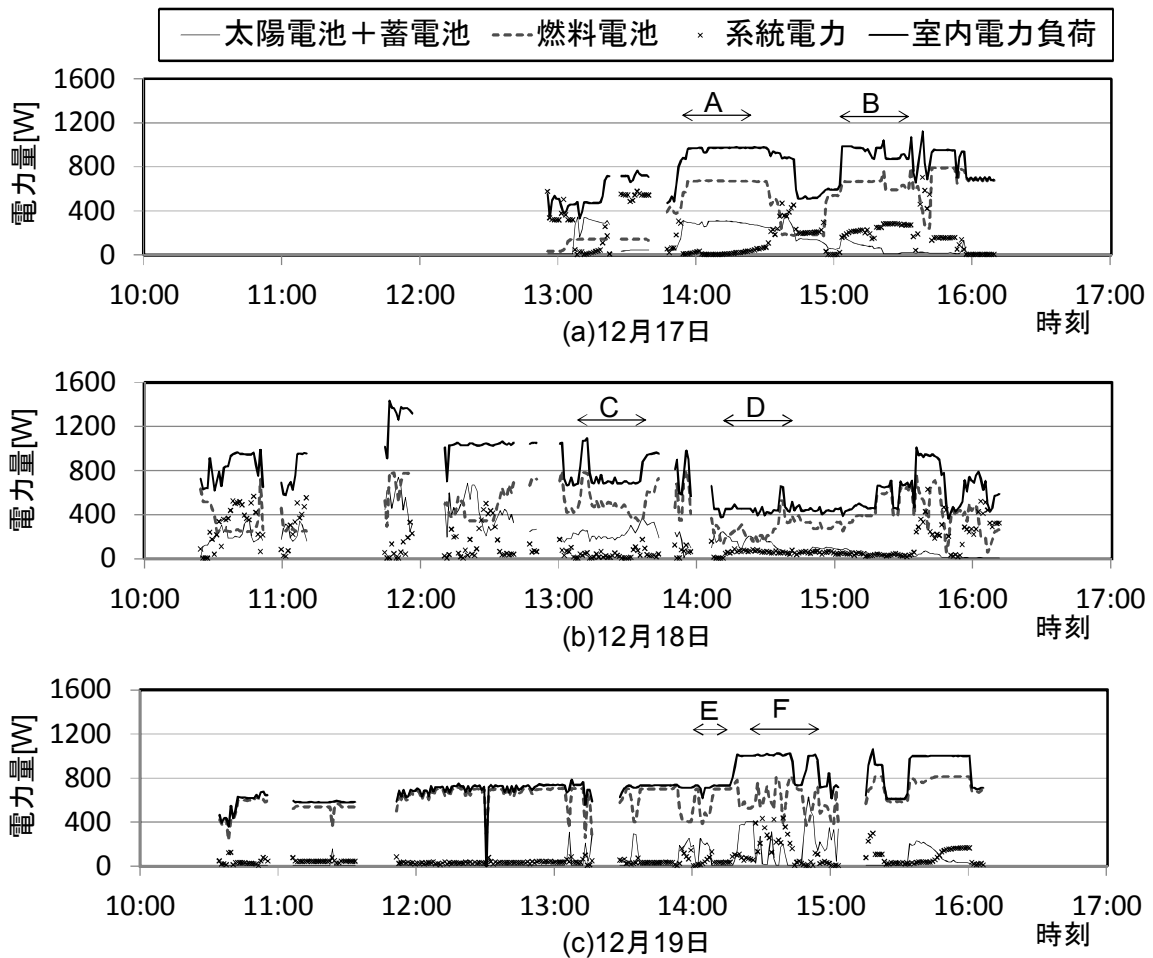


図 16 スマート水素ハウスのモデル実験事例

燃料電池の発電効率について述べる。水素供給及び燃料電池運転実証期間中の水素供給量 (=消費量) と発電量のデータ計測を 1 秒毎に行い、実験で使用した純水素型燃料電池の発電効率を算出した。発電効率の算出には次式を用いた。

$$\eta = \frac{I \times V}{\frac{P}{T} \frac{Q}{R_{H_2}} \Delta H} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $\eta$  : 効率[%]、 $I$  : 電流[A]、 $V$  : 電圧[V]、 $P$  : 圧力[Pa]、 $T$  : 温度[K]、 $Q$  : 水素消費量[m<sup>3</sup>/s]、 $R_{H_2}$  : 水素ガス定数[J/mol/K]、 $\Delta H$  : 水素燃焼熱[J/mol]

3 日間の稼働実績 (27,803 データ) を発電量と効率の関係に整理したのが図 17 である。低負荷側では効率が若干高まることが分かる。以上のように、部分負荷から定格にかけて発電効率の実績値が高く維持されていることを確認した。純水素駆動型燃

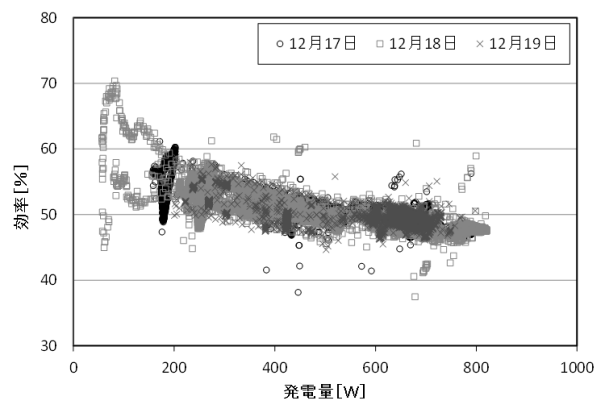


図 17 純水素駆動型燃料電池の発電量と効率の関係 (2012 年 12 月 17~19 日)

料電池に関しては、負荷変動の大きい需要家近接の分散電源として有望であると言える。

## 5 低炭素都市評価技術の開発

### 5. 1 自然エネルギー賦存量調査

各地域で太陽光発電による発電量、風力発電による発電量を算出するため、自然エネルギーの賦存量について、太陽光、風力、バイオマスのデータベースを作成した(図18)。データベースの整備地域については、2015年より大都市圏を中心に燃料電池自動車のための水素ステーションが整備されることから、比較的早期に水素ネットワークが整備されることが想定される以下の地域について整備した。

- ・札幌地域：北海道石狩振興局内
- ・関東地域：茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県
- ・中部地域：岐阜県、愛知県、三重県
- ・関西地域：滋賀県、京都府、大阪府、兵庫県、奈良県、和歌山県
- ・北九州地域：福岡県

### 5. 2 低炭素都市評価システムの開発

低炭素都市評価システムは、大きく分けて街区空調負荷モデル、CO<sub>2</sub>計量モデルから構成される。街区空調負荷モデルは、ある街区領域を対象に気象変化(温度・風)に応じた建物空調負荷を算定することが可能なシステムである。街区空調負荷モデルの出力を用いることで、CO<sub>2</sub>計量モデルは、街区に存在する複数の建物を対象に、それぞれの建物単位でのエネルギー負荷、CO<sub>2</sub>排出量、経済性を評価することができる。図19にツールの画面イメージを示す。エクセルシートに建物配置や設備システムを入力すると、都市域の1次エネルギー消費量や導入コストを出力する仕組みである。

開発ツールを用いた2つの解析事例について紹介する。

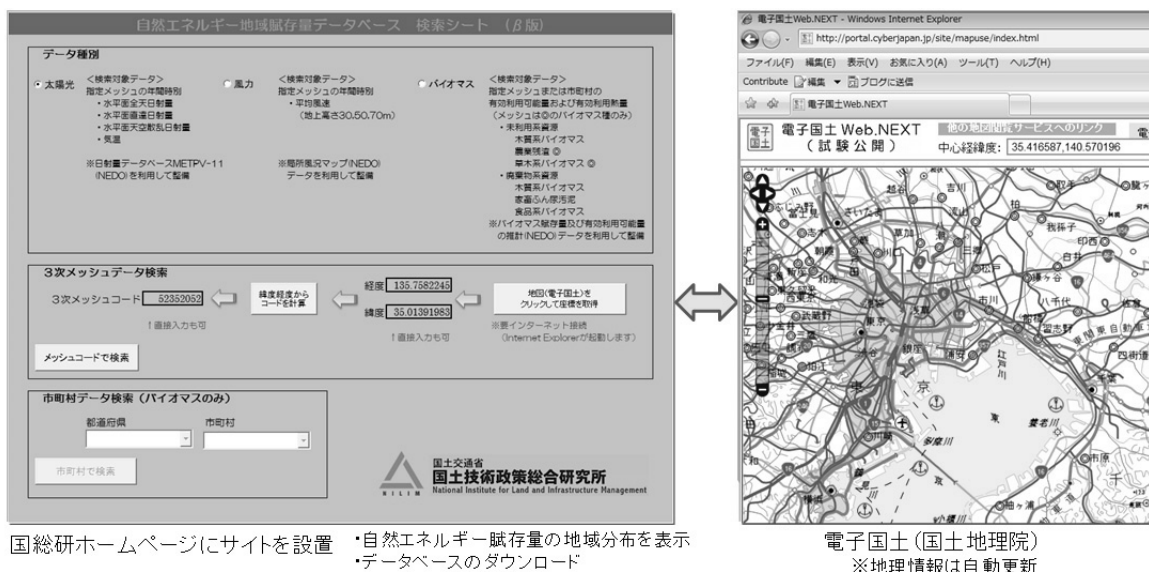
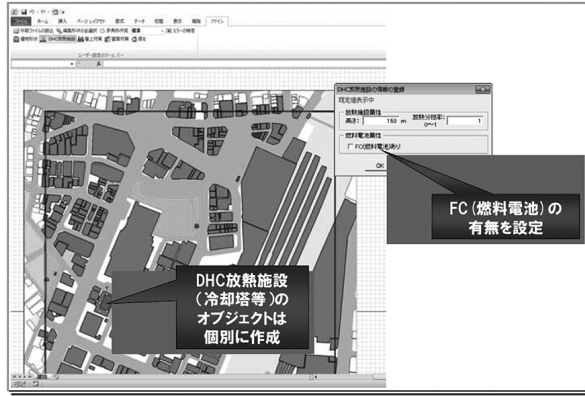


図18 自然エネルギー賦存量データベース





エクセルシートに建物配置や設備システムを入力



| 街区全体の評価               |               | (単位)         |
|-----------------------|---------------|--------------|
| エネルギー評価               |               |              |
| 1次エネルギー使用量(電力)        | 13,854        | GJ           |
| 1次エネルギー削減量(ガス)        | 7,194         | GJ           |
| 1次エネルギー削減量(水素)        | 4,338         | GJ           |
| <b>1次エネルギー削減量(合計)</b> | <b>25,386</b> | <b>GJ</b>    |
| CO2排出量(電力)            | 5,008         | t-CO2        |
| CO2排出量(ガス)            | 1,804         | t-CO2        |
| CO2排出量(水素)            | 940           | t-CO2        |
| <b>CO2排出量(合計)</b>     | <b>7,752</b>  | <b>t-CO2</b> |
| 経済性評価                 |               | (単位)         |
| 燃料費(電力)               | 21,538        | 千円           |
| 燃料費(ガス)               | 3,714         | 千円           |
| 燃料費(水素)               | 2,430         | 千円           |
| <b>燃料費(合計)</b>        | <b>27,682</b> | <b>千円</b>    |

都市域の1次エネルギー消費量や導入コストの試算

図19 都市の低炭素性の評価 (評価ツールの画面イメージ)

一つ目の解析対象は図20に示す住宅地(練馬市役所西地区)である。水素パイプラインの普及により各戸の純水素型PEFCの導入を仮定し、表2に示す、現在(2012年)から2030年に至る燃料電池・水素価格の低減シナリオを設定する。シナリオ前提条件は以下の通りである。

- ・将来的な燃料電池の性能(定格発電効率)、システム価格および水素供給コストはNEDO「燃料電池・水素技術開発ロードマップ2010」に基づく。
- ・2015年までの燃料電池の発電効率は同レベルとし、コスト低減優先とする。
- ・水素供給コストは各家庭までの水素インフラを含むコストと仮定する。

解析結果を図21に示す。各建物に純水素型のPEFCが導入されるとCO<sub>2</sub>排出量削減率については、66~68%程度の高い削減効果が得られる。CO<sub>2</sub>削減コスト(現状の設備を基準として新しい設備導入・運用コストの増加分を見積もり、1トンのCO<sub>2</sub>削減

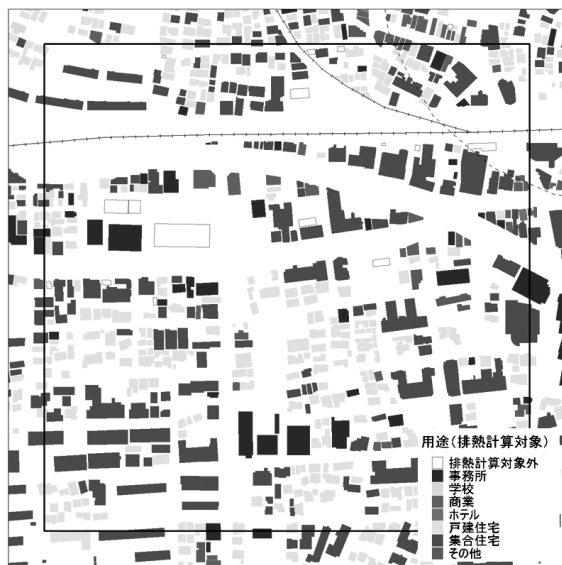


図20 住宅地の解析対象

表2 水素のシナリオ

| 項目                          | 2012年 | 2015年 | 2020年 | 2030年 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 燃料電池価格[万円/kW]               | 270   | 100   | 50    | 40    |
| 定格発電効率(LHV) [%]             | 36    | 36    | 40    | 46    |
| 水素供給コスト[円/Nm <sup>3</sup> ] | 120   | 90    | 60    | 40    |

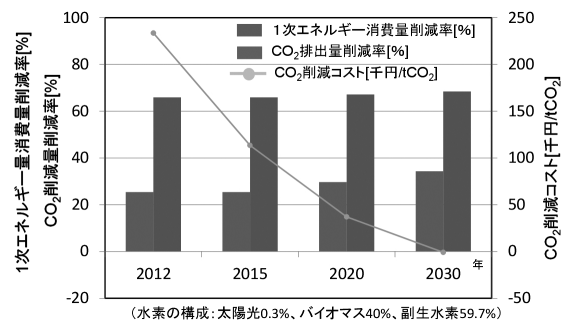


図21 住宅地への水素導入によるCO<sub>2</sub>削減コストの将来予測

減量当たりの数値に換算したもの)に着目すると、2012年では約240千円/t-CO<sub>2</sub>かかっているものが、年とともに徐々に低下し、2030年にはほぼゼロになる。これは、シナリオ通りに事が進めば、現在のガス給湯器とほぼ同じコスト負担で純水素型システムを導入することが出来て、しかもCO<sub>2</sub>排出量を大幅に削減可能であることを意味している。

次に、業務地への水素導入効果を述べる。家庭用および業務用の双方の燃料電池が市場に普及する2030年を想定し、前述の燃料電池・水素価格を前提条件とした。解析対象は、図21a)に示す西池袋地区である。この街区では地域熱供給システムが導入されており、地域熱供給システムが実際に導入されている建物は11棟、総床面積55万m<sup>2</sup>である。今回の解析では、延床面積5,000m<sup>2</sup>以上の建物として、総床面積84.6万m<sup>2</sup>をシミュレーション対象とする(住宅用途は解析対象にしない)。地域熱供給システム地域における水素導入効果について検討を行うに当たり、地冷が導入されていない条件で、FCの導入の有無、地冷が導入されている条件で、FC導入の有無の計4ケースを実施した(燃料電池は純水素型SOFCとする)。初期・運用コストの計算条件を表3に一覧する。

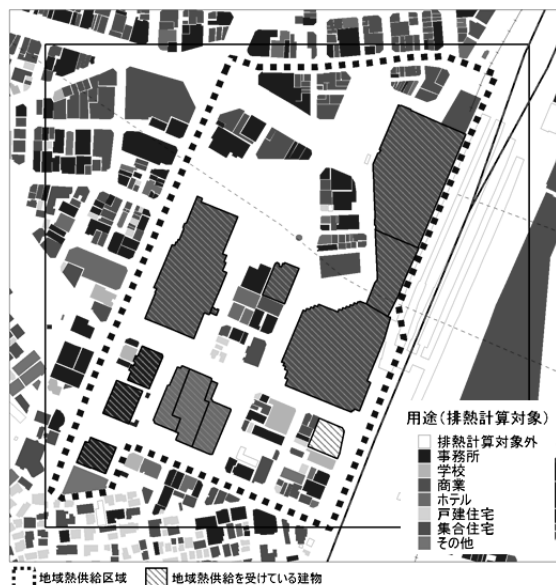


図22 業務地の解析対象

表3 コスト等算出の前提条件(業務地)

|                   |   |
|-------------------|---|
| 燃料電池システム仕様        | 純水素型SOFCあるいはPEFC  |
| 定格発電容量            | 電力最大需要の40%  |
| 定格時の効率            | 発電効率50%LHV、熱回収率30%LHV   |
| 一次エネルギー・CO2排出量原単位 | 電気9,760kJ/kWh、都市ガス45MJ/Nm <sup>3</sup> 、水素8MJ/Nm <sup>3</sup><br>電気0.555kg-CO <sub>2</sub> /kWh、都市ガス2.29kg-CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> 、水素0.066kg-CO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup><br>※太陽光0.3%、バイオマス40%、副生水素59.7%由来                                    |
| 建設費(初期投資)         | コージェネシステム(FC)原単位:200千円/kW(2030年を想定)<br>冷熱源機器原単位:70千円/RT(各冷熱源機器で同価格)<br>蒸気ボイラ原単位:800千円/(t/h)<br>配管設備原単位:2千円/m <sup>2</sup> (個別)<br>電気設備原単位:40千円/kW(個別)、100千円/kW(地冷)<br>地域導管建設費(地冷)原単位:3,600千円/t(冷水導管工事費、700A)、4,000千円(蒸気導管、300A)、30千円/m <sup>2</sup> (土木工事費) |
| 投資償却費             | 建設費合計に対し、15年、年率4.0%で年間経費を算出   |
| 電気・ガス料金           | 電気:16円/kWh、都市ガス50円/Nm <sup>3</sup> 、水素40円/Nm <sup>3</sup>   |
| 維持費、メンテナンス        | 設備維持費原単位:建設費の3.5%、FCメンテナンス費:2.5円/kWh  |
| 人件費               | 冷熱源機器システム管理6,000千円/人(システム毎に2名)<br>FCシステム管理6,000千円/人(システム毎に1名)   |

表 4 業務地への水素導入による CO<sub>2</sub>削減コスト (2030 年)

| 評価項目   | 個別・FC無    | 個別・FC有          | 地冷・FC無        | 地冷・FC有          |
|--|-----------|-----------------|---------------|-----------------|
| エネルギー評価                                      |           |                 |               |                 |
| 1次エネルギー使用量 [GJ]                              | 2,091,150 | 1,568,018       | 2,002,154     | 1,525,177       |
| 1次エネルギー削減量 [GJ]<br>/削減率 [%]                  | —         | 523,132<br>25.0 | 88,996<br>4.3 | 565,973<br>27.1 |
| CO <sub>2</sub> 排出量 [tCO <sub>2</sub> ]      | 118,049   | 63,886          | 112,914       | 61,964          |
| CO <sub>2</sub> 削減量 [GJ]<br>/削減率 [%]         | —         | 54,163<br>45.9  | 5,135<br>4.3  | 56,085<br>47.5  |
| 経済性評価 (千円)                                   |           |                 |               |                 |
| 建設費 (初期投資)                                   | 6,003,790 | 11,891,290      | 7,286,611     | 14,503,611      |
| 投資償却費  | 539,981   | 1,069,503       | 655,358       | 1,304,455       |
| 電気・都市ガス・水素料金                                 | 3,356,286 | 4,059,381       | 3,199,310     | 3,686,579       |
| 維持費・メンテナンス                                   | 210,133   | 478,095         | 255,031       | 569,551         |
| 人件費  | 396,000   | 396,000         | 18,000        | 18,000          |
| 年間費用   | 4,502,400 | 6,002,979       | 4,127,699     | 5,578,585       |
| CO <sub>2</sub> 削減コスト [千円/tCO <sub>2</sub> ] | —         | 27.7            | 0             | 19.2            |

業務地のシミュレーション結果を表 4 に示す。個別（地冷なし）の場合は、FC 導入により、1 次エネルギー削減率 25%、CO<sub>2</sub>削減率 46%が得られる。地冷・FC 導入では、1 次エネルギー削減率 27%、CO<sub>2</sub>削減率で 48%となった。コスト削減効果については、個別（地冷なし）の場合は、FC 導入における CO<sub>2</sub>削減コストは約 28 千円であるのに対し、地冷・FC 導入による CO<sub>2</sub>削減コストは、19 千円となった。表に示していないが、燃料電池を純水素型 PEFC とした場合も、地冷・FC 導入有利の傾向は変わらなかった。純水素型 PEFC 導入時の CO<sub>2</sub>削減コストは個別（地冷なし）が約 29～36 千円であるのに対して、地冷を考慮した場合には、18～28 千円である。純水素型 SOFC と比べて純水素型 PEFC はエネルギー効率が低下する。その理由は、冷熱需要を賄うため、PEFC の低温水を利用する単効用吸収型冷凍機を考えた場合、SOFC で用いる二重効用吸収型冷凍機と比べて COP が 0.7 と低く、低温排熱の 30%を捨てているためである。

以上のように、開発ツールを用いることにより、自治体、都市開発事業者等が都市域の水素導入シナリオを検討するための基礎的情報として、都市域の建物、設備を入力するとエネルギー消費やコストなどを試算することができる。

## 6 おわりに

水素パイプラインの敷設に当たっては水素エネルギー事業の存在・誕生を前提とする。事業者の許認可は経済産業省の管轄であり、水素社会の実現には他省庁との連携を含めた制度的な準備作業も求められる。

本総プロでは、国土交通省が管轄する建築物等の関連法令と水素社会の接点を検討することも研究目的の一つとし、建築基準法において水素配管を想定した技術基準の

検討を行い、建物壁を貫通するガス管の設置条件、建物空間内のガス検知器の適切な配置等に関する開発整備を実施したところである。将来的に都市域の水素パイプラインが実際に敷設され、さらに建物に純水素型の燃料電池の導入、普及が進展すると、省エネ基準、CASBEE や自治体の低炭素まちづくりなど国交省関連の各種施策に、本総プロで取り組んだ水素等技術が反映されていくと考えられる。

燃料電池はわが国の新産業創造に貢献し得るキーテクノロジーである。水素の安全管理技術や環境・エネルギー評価手法などとあわせてパッケージ化することにより、国際的な技術競争力の向上に資すると期待される。

**謝辞** 本研究の実施に当たり、低炭素・水素エネルギー活用検討委員会の助言を得た。有識者委員を以下に示す（敬称略）。

委員長 柏木孝夫

顧問 村上周三

委員 秋澤淳、大谷英雄、坂本雄三、澤地孝男、松野秀生

また、つくば市中央公園で実施したスマート水素ハウスのモデル実験では市関係者に多大なご協力を得た。合わせて深謝する次第である。

**注記** 委員会の活動報告は参考文献 4)、スマート水素ハウスのモデル実験は参考文献 5) を参照されたい。

## 参考文献

- 1) 日本国温室効果ガスインベントリオフィス：日本の部門別二酸化炭素排出量の推移（1990-2011 年度）([http://www.jccca.org/chart/chart04\\_05.html](http://www.jccca.org/chart/chart04_05.html)、2013 年 10 月 1 日閲覧)
- 2) 田中救人：燃料電池自動車のトンネル内における安全性に関する研究、JICE REPORT、Vol.8、2005、pp.47-52
- 3) 社団法人日本ガス協会：平成 19 年度地方都市ガス事業天然ガス化促進対策調査「水素供給システム安全性技術調査（委員会の運営等）」調査報告書、2008.3
- 4) 特集国土交通省総合技術開発プロジェクト「低炭素・水素エネルギー活用社会に向けた都市システム技術の開発」、IBEC、NO. 188、Vol. 32-5、2012.12
- 5) 水素活用型都市インフラの構築に向けた共同溝内ガス管の耐圧気密性に関する研究（その 4～6）、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、2013.9