

FAPIG

THE FIRST ATOMIC POWER INDUSTRY GROUP



169

2005. MARCH

サステナブルな未来を築いていくか。知恵と知恵が

【サステナブル】、英語で表すと「sustainable」

たしかになじみのない言葉です。

しかしそれは、これからの地球と社会、

そして私たちの暮らしにとって大切なキーワードとなるものです。

さて、サステナブルとは『持続可能な』という意味です。

解かりやすく言えば、「これからも続けていくことができる」ということ。

いまの世代だけでなく、次の世代、その次の世代へ向けて、

人と社会と地球のよりよい関係をつくり出し、

これをずっと継続しようという大きなテーマなのです。

そこには現在の資源の枯渇や地球温暖化、環境汚染といった様々な問題を解決し、

私たち人間も含めたより多くの生命が共に生きる未来があります。

エバラは、その実現に必要な『循環型技術』を開発しています。

循環型技術とは、たとえば、廃棄物を燃料や化学原料、

電気や熱に変えることで、新しい資源の循環を生み出す技術のこと。

さらに、風や太陽光などの自然エネルギーの有効活用や、

水資源の新たな循環によって、環境への負荷を小さくしていきます。

サステナブル・・・ それは、新しい未来を開く力を秘めた言葉です。

サステナブルな循環型社会の実現を目指す、エバラです。



株式会社 荏原製作所

東京都大田区羽田旭町11-1
電話(03)3743-6111
http://www.ebara.co.jp

●サステナブル・パズル(小冊子)を差し上げます。当社宣伝課N係宛にハガキをご送付ください。

FAPIG

THE FIRST ATOMIC POWER INDUSTRY GROUP

2005-3/平成16年度 第3号

No.169

目次

■ 報 告

海水ウラン採取用のモールド捕集材の合成と実規模システムの検討(3)
玉田正男 / 瀬古典明 / 笠井 昇 / 清水隆夫

■ 紹 介

高温ガス炉 (HTGR) の炉心拘束機構に用いる
C/C複合材の構造健全性に関する研究(13)
辻 延昌 / 柴田大受 / 角田淳弥 / 石原正博 / 伊与久達夫
3次元構造に対する1次応力評価手法の開発(18)
定廣大輔 / 柴本 宏 / 長島英明 / 笠原直人 / 井上和彦
構造ヘルスマニタリングシステムの開発(23)
熊谷仁志
施設管理システムの紹介(27)
阿邊川仁 / 鈴木美和

■ 論 文

石炭価格高騰等で有利となる原子力発電(32)
田邊敏憲

■ 随 筆

中山道一人旅(その5) ~近江路を歩く~(42)
米田正章

■ グループ情報

FAPIGの機構(49)

表紙デザイン：上杉義昭

CONTENTS

■ Report

Synthesis and Practical Scale System of Braid
 Adsorbent for Uranium Recovery from Seawater.....(3)
 M. Tamada / N. Seko / N. Kasai / T. Shimizu

■ Introduction

Study on Structural Integrity of C/C Composite
 Using as Core Restraint Mechanism in HTGR(13)
 N. Tsuji / T. Shibata / J. Sumita / M. Ishihara / T. Iyoku

The Study on Evaluation Method for Primary Stress of 3-D Structure(18)
 D. Sadahiro / H. Shibamoto / H. Nagashima / N. Kasahara / K. Inoue

Development on Structural Health Monitoring System(23)
 H. Kumagai

Facility Management System Promotion(27)
 H. Abekawa / Y. Suzuki

■ Paper

The Advantages of Nuclear Power in the Wake of the Soaring Prices of Coal(32)
 T. Tanabe

■ Essay

Sentiment of Solitary Journey on Nakasendo
 - Hike Through Oumiji -(42)
 M. Yoneda

Cover Design : Yoshiaki Uesugi

海水ウラン採取用のモール状捕集材の
 合成と実規模システムの検討

Synthesis and Practical Scale System of Braid
 Adsorbent for Uranium Recovery from Seawater

玉田正男* 瀬古典明* 笠井昇* 清水隆夫**
 Masao Tamada Noriaki Seko Noboru Kasai Takao Shimizu

〔概要〕

モール状捕集材は係留システムの軽量化により捕集コストの低減化が期待できる新しい形状の捕集材である。海水ウランの捕集に関しては、アミドキシム基が海水中に溶存するウランに対して高い親和性をもつ。この官能基を放射線グラフト重合によりポリエチレン糸に導入し、そののち編み込み加工によりモール状のウラン捕集材を作製した。2.8mmol/g-捕集材の官能基密度をもつ捕集材の作製には5時間のグラフト重合反応が必要であった。得られた捕集材を沖縄沖に係留した結果、30日の浸漬で1.5g/kg-捕集材のウランの吸着が可能であった。年間1200トンのウランを捕集するためには134km²の海域が必要であるが、沖縄から土佐湾にかけての海域でウランの捕集に適した海域は6000km²あることがわかった。

1. はじめに

日本における原子力発電の設備規模は現在4,600万kWであり、総発電電力の約34%を占めている。1年間の発電に必要なウラン燃料は8,500トンであるが、その全量を輸入に頼っているのが現状である。また、世界のウラン鉱山・鉱床からの2003年のウランの生産量は需要の52%に過ぎず、ウラン生産量と原子炉要求量のギャップは在庫の取り崩しにより埋められている¹⁾。世界の原子力発電の需要を考えた場合、近い将来ウラン燃料の供給が不足し、ウラン価格が高騰する可能性がある。そのため、プルトニウム利用によるエネルギーセキュリティ確保と、原子力発電所からの使用済燃料対策の2つのメリットがある核燃料サイクルは、原子力を利用する必要があるわが国にとって不可欠なものである。しかし、完全に閉じた核燃料サイクル体系に移行するまでには、半世紀以上の時間が必要だと言われている。電力自由化の下での軽水炉の長寿命化を考慮すると、

FBRが軽水炉と全て置き換わるのは22世紀に入ってからであり、来世紀まで軽水炉を運転するためのウランの確保は欠かせない。したがって、ウラン鉱山・鉱床以外のウラン資源として有望な海水ウランの捕集が可能になれば、わが国のエネルギーセキュリティはより頑強なものになり、理想的な核燃料サイクル体系を完成するまでの時間的余裕を与えることができる²⁾。

海水には地球上に存在する100余種の元素のうち77元素が溶け込んでおり、ウランに注目するとその濃度は3.3ppbであり、1トンの海水には、3.3mgが溶けていることになる。非常に低い濃度ではあるが、世界中の海水量を掛けてその全量を計算すると、45億トンになる。これは利用可能な鉱石ウランの約1000倍量に匹敵する。さらに、海水からウランを採取しても、海底岩盤表層から溶存ウラン量の1000倍以上のウランが溶出するため資源量としては無尽蔵といえる。また、日本近海を流れる黒潮により運ばれるウラン量は、年間

*日本原子力研究所 高崎研究所 材料開発部 環境機能材研究グループ

**電力中央研究所 環境科学研究所 陸・水環境領域

520万トンと試算されており、日本の原子力発電に必要とされるウラン資源は、このうちの0.2%を捕集すれば賄うことができる。

海水ウランの捕集については、これまでに数多くの捕集材がスクリーニングされ^{3)~6)}、アミドキシム基を有する材料が極めてウランに対して高い選択性を有することが知られている。われわれは、放射線グラフト重合技術を用いてアミドキシム基を導入した布状の捕集材を合成し⁷⁾、得られた布状捕集材を積層してカセット状にし、青森県のむつ沖合に係留する海洋試験を行い⁸⁾、2001年に1kgのイエローケーキの回収に成功した。この海洋試験に基づき、実用化のための技術的課題の抽出を行った結果、捕集材を海中に係留するシステムの軽量化がウラン回収コストの合理化に向けて重要な課題であることが明らかになった⁹⁾。

係留システムの軽量化について検討した結果、ロープに糸状の捕集材を編み込んだ構造のモール状捕集材では、捕集機能と係留機能を併わせ持つため、係留に関わるコストが大幅に低減できる見通しが得られた。本報告では、モール状捕集材について、放射線グラフト重合法による作製法、海洋試験によるウランの捕集性能の評価、実用に即した係留システム、実用システムに適した海域について検討した。

2. 放射線グラフト重合によるモール状捕集材の作製

モール状捕集材の作製では、まず始めに放射線グラフト重合法により、糸状の捕集材を合成し、作製した糸状捕集材を編み上げてモール状捕集材に加工した。

2.1. 糸状捕集材の合成

(1) 作製方法

放射線グラフト重合法は、基材に放射線（電子線またはγ線）を照射して活性点を形成させたのち、反応試薬を接ぎ木のように重合させることにより、布や糸などの種々の形状の基材に目的とする官能基を導入する手法である。導入された官能基は化学処理により、金属イオンと親和性の高いキレート基への変換が可能であることから、種々の形状の金属捕集材の作製が可能である。海水のウランの捕集に適したアミドキシム基の導入では、図1に示すように反応試薬としてアクリロニトリルを使用し、グラフト重合ののちヒドロキシルアミンにより、グラフト重合鎖中のシアノ基をアミドキシム基へと変換した。反応条件の決定では、基材となるポリエチレン糸（792デニール/220フィラメント、デニールは長繊維の太さを表す単位で、9,000mで繊維の重さが1gのものが1デニール）を10cmの長さに切り出し、窒素雰囲気中で、200kGy照射した。照射後の基材は反応試薬と所定時間、40℃で反応させた。反応試薬はアクリロニトリル（AN）とメタクリル酸（MAA）の混合液を用いた。ANとMAAの比率は70/30重量%で行い、溶媒にはジメチルスルホ

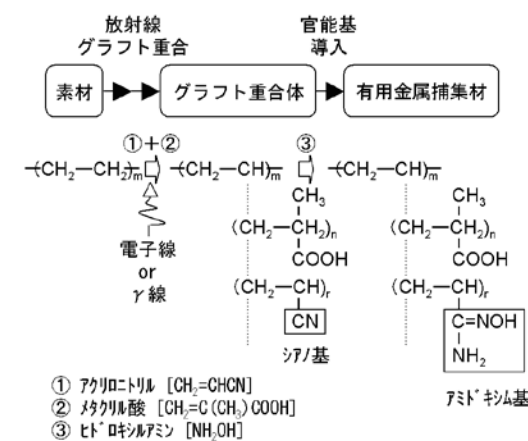


図1 放射線グラフト重合法を利用したモール状捕集材の合成方法

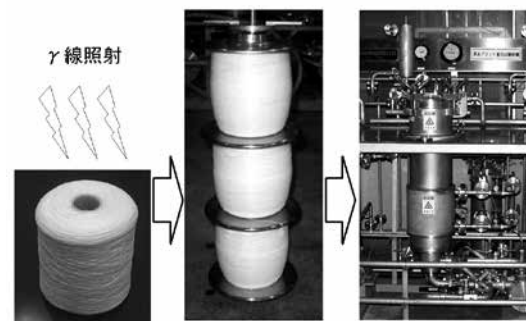


図2 ポビン巻きした原糸および反応装置

キシド（DMSO）を用いた。MAAは捕集材の親水性を向上させるために加えている。反応した量は以下の式のグラフト率（Dg）で示す。

$$Dg[\%]=100(W_1 - W_0)/W_0 \quad (1)$$

ここで、 W_1 、 W_0 はそれぞれ重合後の乾燥重量、重合前の基材の重量である。

大量合成する場合は、図2に示すようにポビンに巻いた1kgの基材を-78℃に冷却してγ線を200kGy照射した。照射後のポビンは反応治具に装着した後、反応試薬を強制的に循環させることのできる反応装置に装填した。次いで、あらかじめ窒素で置換した反応試薬溶液（AN/MAA=70/30重量%、50重量%DMSO溶液）により、40℃でグラフト重合を行った。

グラフト重合で導入したアクリロニトリル中のシアノ基はヒドロキシルアミンと反応させることにより、アミドキシム基に変換した。アミドキシム化反応は3%の塩酸ヒドロキシルアミン中性溶液（水/メタノール=50/50重量%）中、80℃で1時間還流させて行った。アミドキシム化反応後は、捕集材の親水性を向上させる目的で、2.5%の水酸化カリウム水溶液中で80℃、30分浸漬してアルカリ処理を行った¹⁰⁾。

(2) 作製方法の最適化

反応試薬中に基材を浸漬させて反応させたグラフト反応時間とグラフト率の関係を図3に示す。糸を基材とした場合のグラフト率をこれまでの不織布基材の場合と比較すると、各反応時間におい

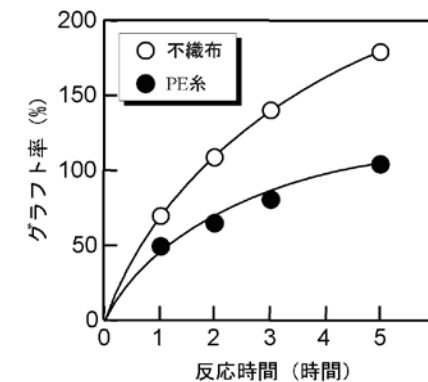


図3 グラフト率の反応時間依存性

て、糸へのグラフトは不織布の場合の60%程度であり、グラフト率が低下した。モール状捕集材の基材に用いているようなポリエチレン糸は、繊維の引張強度を保持して繊維径を細くするために延伸処理されている。グラフト反応において、ポリエチレンの延伸処理により基材の分子配向度が高くなることにより、グラフト率は低下する¹¹⁾。しかし、5時間の反応でグラフト率が100%程度に達することから、ウランの効率的な捕集に必要な官能基量である2.5mmol/g程度の捕集材の合成は可能である。ポビン巻にして重合装置を用いて大量合成した場合も、5時間のグラフト重合を行うことにより、グラフト率が100%のものを得ることができた。その後の化学処理により、アミドキシム基密度2.8mmol/gの糸状捕集材を合成することができた。

2.2. モール状捕集材への加工

(1) 加工法

図4に示すように得られたウラン捕集機能をもつ糸状捕集材を加工機を用いてモール状捕集材を作製した。モール状捕集材の外観図を図5に示

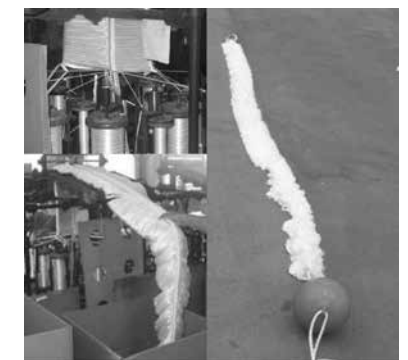


図4 加工機によるモール状捕集材の作製

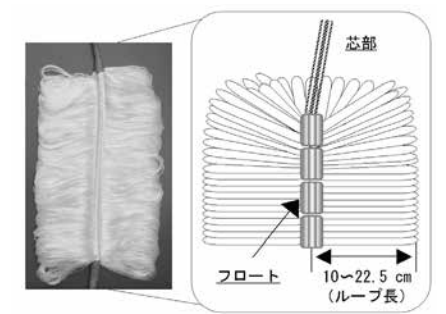


図5 モール状捕集材の外観

す。この捕集材は、芯部にフロートを組込むことで浮きとしての効果を、周部には捕集機能を備えることでそれ自身が捕集材と係留策の役目を果たすことができる。

(2) 糸状捕集材の力学的特性

糸状捕集材をモール状の捕集材に加工する際には、糸状捕集材 1 dあたり 1 gの引張強度を必要とする。そのため、引張試験は糸状捕集材を作製する過程で強度が変化する放射線照射前後、グラフト反応前後、アミドキシム化反応前後で行った。引張試験は空気中で行い、繊維の破断時にかけていた荷重をその強度とした。

グラフト重合に必要な線量は200kGyであり、この線量の照射に伴う強度変化を図6に示す。線量の増加に伴い、引張強度は低下し、200kGyの照射後では未照射値の半分の強度になるが、1g/dの強度を保っていた。次に、グラフト反応を行った繊維の強度変化を図7に示す。グラフト反応の進行

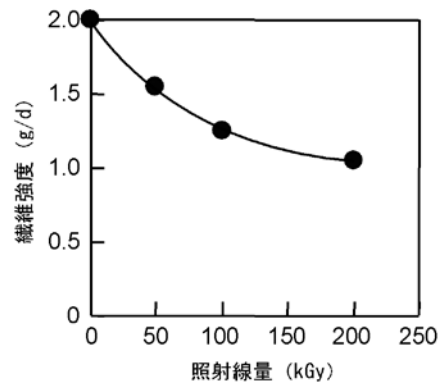


図6 照射線量に対するポリエチレン繊維の引張強度

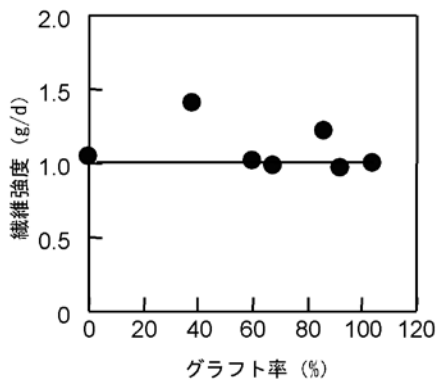


図7 グラフト率に対するポリエチレン繊維の引張強度

に伴う強度の低下はなく、官能基を導入できることが明らかになった。さらに、アミドキシム化反応でも強度の低下は認められなかった。

3. 海洋試験による捕集性能評価

海洋試験による捕集性能の評価は、沖縄県恩納村沖 3 kmにて行い、モール状捕集材のループ長（フロートの組み込んだ芯部から端までの長さ）の異なるものを作製し、形状の最適化を行なった。モールのループ長を10, 15, 22.5cmと変えて加工したモール状捕集材（図5）を海底から立ち上げて、30日間係留した時のウラン捕集量とループ長の関係¹⁰⁾を図8に示す。ループ長が長くなるにつれて、捕集材外側の捕集量は高くなり、2.5g-U/kg-捕集材となった。しかし、捕集したウランの総量は、ループ長に関わらず一定であったため、引き上げ作業などでの取扱の容易さからループ長が10cm、すなわちモール幅が20cmのものを選択

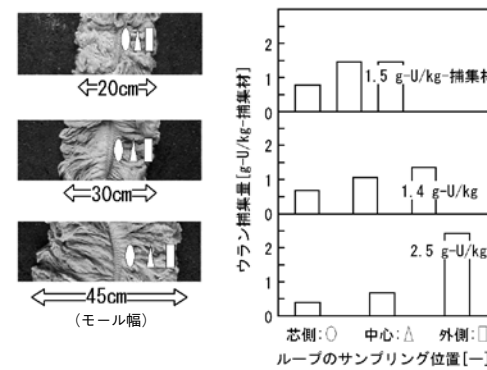


図8 モール状捕集材のウラン捕集分布

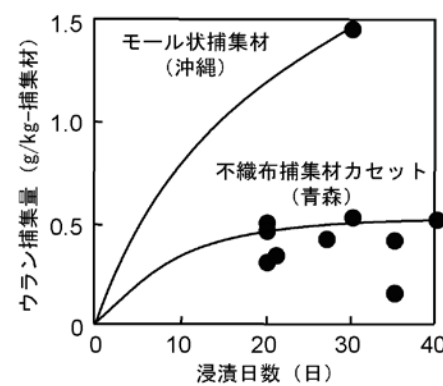


図9 モール状捕集材と不織布捕集材とのウラン捕集量の比較

した。また、深度の異なる位置での捕集量の差異は認められず、捕集材 1 kgあたり、平均で1.5gのウランを捕集した。

青森県むつ関根浜沖合で海洋試験を行った捕集結果¹²⁾と比較すると、捕集材カセットに充填した不織布捕集材が0.5g (g-U/kg-捕集材)であるのに対し、沖縄における海洋試験では、モール状捕集材により、1.5g (g-U/kg-捕集材)の捕集量に達した（図9）。沖縄海域で行った場合、海水温が10℃上昇することで1.5倍の効果があり、さらに、モール形状にすることにより、海水との接触効率が2.0倍に向上したことで、青森県むつ関根浜沖の海域試験と比較して併せて約3倍の捕集性能が得られた。

4. 実用に即した係留システム

図10に示すこれまでの青森県沖における海洋

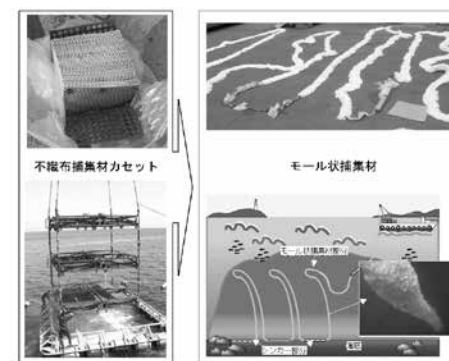


図10 布状捕集材カセット浸漬方法とモール状捕集材浸漬概念図

表1 不織布捕集材とモール状捕集材の係留システムの相違

項目	不織布捕集材係留システム	モール状捕集材係留システム
捕集材収納容器	吸着床およびカセットが必要	不要
係留物の重量 (捕集材350kg使用と仮定)	カセット432ヶ, 吸着床12ヶ 総重量3.8トン	モール100×4本 総重量400kg
捕集材の回収	大動力	小動力
波浪の影響 (台風など)	波風の影響を強く受ける	海底立ち上げのため影響を受けにくい
船舶の航行	支障あり	支障なし
藻類の着生	海面上部で着生	海底立ち上げのため影響を受けにくい

試験で使用した不織布捕集材係留システムと今回沖縄で行なったモール状捕集材の係留システムを比較すると、モール状捕集材を利用した係留システムでは捕集材収納容器を必要しないため、安全面から見ても実現度が高い（表1）。不織布捕集材係留システムでは約80%が係留のため費用であり、捕集材350kgを係留するための捕集材カセットおよび係留装置の総重量も約4tであった⁹⁾。モール捕集材を利用した場合、その重量が10分の1程度に軽減され、海域における占有面積も大幅に減少できる。また、その係留方法の特性から、海嘯の影響も受けにくく、船舶の航行にも支障をきたさないことも予想できる。

これまで¹³⁾、海水ウランを効率的・経済的に捕集する方法として、図11に示すようにフロートを内蔵し係留と捕集の機能を併せ持つモール状捕集材とシンカーを交互につないで海底から立ち上げ係留し、その端部に回収装置を接続する図12のような海水ウラン捕集システムを提案した。さらに、ウランの捕集効率ならびにウラン捕集の障害となる付着生物の種類と付着量を沖縄海

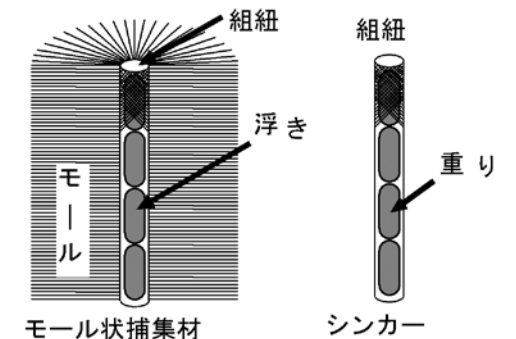


図11 モール状捕集材とシンカー

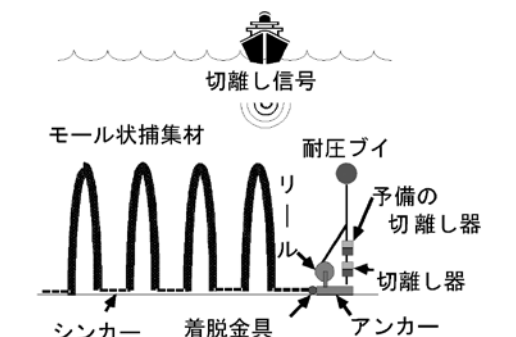


図12 モール状捕集材の係留・回収方法

域で検討した。生物付着はヒドロ虫や珪藻が捕集材 1 kgあたり湿重量30g程度で、処理が難しい大型の殻を持つ生物は付かないことが分かった。また、モール状捕集材の流水抵抗試験に基づいて捕集材を係留するために必要なシンカーの重量を検討した結果、捕集材 1 kgあたりの係留資材が 8 kg程度になることが分かった。これは従来の布状捕集材を用いたシステム⁹⁾の重量の1/5にあたる。

モール状捕集材を用いた海水ウラン捕集の実規模システムとして、年間生産量を1200トンと考え、捕集材係留システムの規模を検討した。ウラン1200トンは原子力発電所の100万kW原子炉6基分の年間使用量に相当する。

4.1. 捕集材の本数

まず、係留の基本仕様として、以下の条件を設定し、モール状捕集材の本数を検討した。なお、ここで言う捕集材の本数は、仮に図12の捕集材の midpoint (立ち上げ係留の上端) で切断したとした場合の本数とする。

- 1) 捕集材 1 本の長さ：60m (質量66kg)
- 2) 年間捕集回数：5回



図13 海域試験地点 (恩納村漁協沖) と沖縄県の観測地点 (屋嘉田沖)

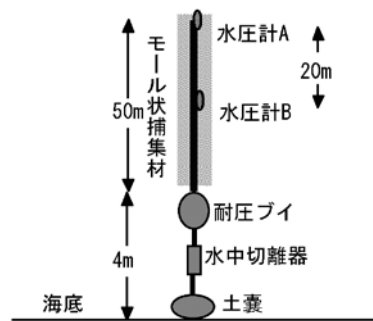


図14 試験係留の構成

- 3) 1 回の係留期間：2ヶ月
 - 4) 海水ウラン濃度 3 mg/トン中での 1 回の捕集量：2.1gU/kg-捕集材
- とした。ここで、4)は、1ヶ月係留して1.5 gU/kg 捕集材という今回の試験結果を、係留期間を2倍にすれば、捕集量が $\sqrt{2}$ 倍になると仮定した。

この設定条件では、年間1200トンのウランを捕集するためには、少なくとも173万本の捕集材を立上げ係留する必要がある。正方形に配列すると、1316行×1316列となる。

このように膨大な数のモール状捕集材を立上げ係留する場合、捕集材を回収する時間と費用を小さくするために、係留間隔を小さくする必要がある。しかし、係留間隔を小さくすると、捕集材の中を海水が通過するうちに、ウランが捕集されて海水ウランの濃度が低下し、捕集効率も低下する。したがって、実際には上記の本数よりも多くの捕集材を係留する必要がある。また、流れで傾斜した捕集材の上を通過する海水中のウランは捕集されない。そこで、まず、捕集材の傾斜について検討した。

4.2. 係留した捕集材の傾斜

図13中に○で示した沖縄県恩納村沖約 3 km、水深100mの海域で、2002年にモール状捕集材の立上げ係留試験を行った。試験係留の構成を図14に示した。捕集材の上端 (A点) と中間 (B点) に小型の自記式水圧計を取り付け、流れによる捕集材の運動を観測した。同時に、係留位置から

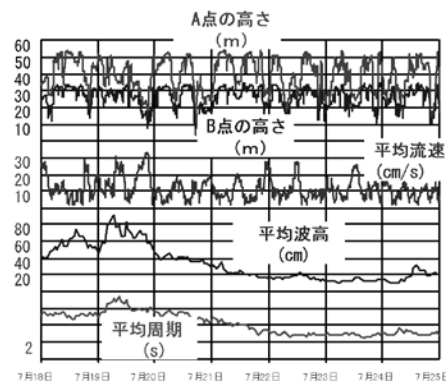


図15 捕集材の傾斜運動によるA点, B点の高さの変化とその時の流れ, 波 (2002年)

100mほど離れた場所に自記式の電磁流速計を設置して流速を観測した。図15に観測結果を示した。係留地点から4.5km北西の屋嘉田沖、水深50mの地点 (図13中の▲) で沖縄県が観測した波浪データを併記した。

図15で流速が大きくなるとA点, B点が下降し、モール状捕集材が傾斜していると考えられる。A点が海底に近づいても、B点は海底に着くことがない。これは、フロートがモール状捕集材に内蔵されていて、浮力が先端から末端まで一様に分布しているためと考えられる。捕集材が海底を引きずると、捕集材の細かい繊維に珊瑚のかけらなどがからみついてしまうので、フロートを捕集材に内蔵させるのは非常に重要なポイントであることが分かる。

なお、7月22日の7時頃に見られるように、流速が小さいにもかかわらず、捕集材が大きく傾斜している。そのときの平均波高は20cm以下と小さいので、これは、流速の測定位置が捕集材の係留位置と離れていることが原因だと考えられる。

捕集材の傾斜角 θ を次式で計算し¹⁴⁾、上端の高さを図示すると図16のようになる。

$$F_x = F_z \{ (-1 + [1 + 4 \{ \max(K_1 V, K_2 V^2) / F_z \}^{1/2}] / 2)^{1/2} \} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1}(F_x / F_z) \quad (2)$$

ここで、 F_x は単位長さの捕集材に係る水平力 (N/m)、 F_z は単位長さの捕集材の浮力 (N/m)、 V は流速 (m/s)、 K_1, K_2 は実験定数である。流水抵抗試験の結果から、 $K_1 = 21, K_2 = 28$ としたが¹³⁾、図16では観測結果に合うように、 $K_1 = 10, K_2 = 100$ としている。また、捕集材の浮力は200g/mである。図から捕集材の運動は上式では評価できるものと思われる。

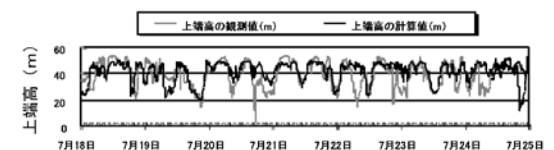


図16 捕集材の傾斜運動による上端 (A点) の高さの変化の観測値と計算値の比較

4.3. 捕集材の係留間隔

モール状捕集材をM行N列の正方格子状に配列して係留する場合の年間ウラン捕集量と係留間隔の関係の関係を次のように考えた。その際、ウラン捕集量は海水中のウランの濃度に比例するものと仮定した。

流れは第1列から第N列に向かって流れるとする。第i列の捕集量 G_i と次の列の海水ウラン濃度 C_{i+1} を次式で評価した。その際、第i列を通過した海水は均一に混合して次の列に流れていくものと仮定した。また、捕集材の太さに比べて係留間隔が十分広ければ海水は係留海域を迂回したりすることなく一様に流れるものと仮定した¹⁵⁾。

$$G_i = (C_i / C_0) K_0 L M P \quad (3)$$

$$C_{i+1} = C_i - G_i / TVHM \Delta x \quad (4)$$

ここで、 Δx は係留間隔、 C_0 は基準濃度 (3 mgU/m³)、 K_0 は基準捕集効率 (2ヶ月で2.1gU/kg捕集材)、 L は捕集材の立上げ長さ (60m)、 P は捕集材 1 mあたりの重量 (1.1kg/m)、 T は係留期間 (2ヶ月)、 V は流速、 H は傾斜した捕集材の上端の高さであり、前節の方法で求められる。

流速は沖縄県が屋嘉田沖の水深50mにおいて2002年5月~2003年1月に観測したデータを用いた。捕集材の係留本数173万本、210万本、250万本、係留間隔1m~128mについて、以上の方法で計算した年間総捕集量を図17に示す。捕集材の係留間隔は、捕集材同士が絡んだりしないよう

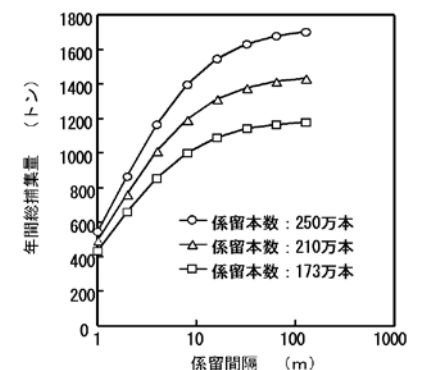


図17 捕集材の係留本数・係留間隔と年間総捕集量の関係

に、捕集材の長さ60mの10分の1程度までが現実的と考えられる。すなわち、計算条件の中では係留間隔8mが現実的と考えれば、係留本数210万本で年間総捕集量が目標値の1200トンになる。係留配列は1449行×1449列、係留海域は11.6km×11.6km、係留面積は134km²となる。なお、捕集材同士が絡まないかという点は今後の課題であるが、ジャイアントケルプが絡むことなく立ち上がっていることを見れば、問題はないと予想される。

5. 実用システムに適した海域

モール状捕集材を用いた海水ウランの捕集に適した海域を水温、定置漁業、船舶航行の観点から検討した。まず、水温の条件からおおよその海域と水深を検討した。さらに、漁業、船舶航行の条件を加えて海域を絞り込んだ。

5.1. 水温

モール状捕集材は水温が高いほどウランの捕集効率が良いので、黒潮が温かい海水を運んで来る海域が適している。黒潮本流のルートを考えて、西表島～宮古島の海域、沖縄～奄美大島の西側海域、種子島・屋久島海域、日向灘、土佐湾などがおおよその適地であることが分かる。

つぎに、水温の鉛直分布から係留に適した水深を検討した。モール状捕集材を海底から60m立上げ、その上に海面まで40mの余裕をとるとすると、係留水深は100m以上ということになる。しかし、図18に示したように、黒潮が流れている海域であっても、水深が深くなると水温が低くなる。例

えば親潮と比べて黒潮の水温が約10℃高いというメリットを生かすとすると、親潮の水深100mの水温約5℃に対して、黒潮の水温15℃、すなわち、係留水深は200m程度までと考えられる。

5.2. 漁業・船舶航行

捕集材の立上げ係留が障害となる漁業としては、定置網、養殖イケスなどがある。移動しながら作業する延縄漁、底引き網漁、刺し網漁、巻き網漁などについては今後の課題であるが、捕集材の係留海域との調整が不可能ではないと考えられる。

船舶航行については、捕集材の立上げ係留が水面下40mまでの間に障害物を置かないので、海上を航行する船舶については支障がない。潜水艦については軍事上の問題であり捕集材の係留海域との調整は困難と考えられる。ただし、潜水艦も領海内では浮上して航行しなければならないので、捕集材を領海内に係留するのであれば問題はないものと考えられる。

なお、通信・電力関係の海底ケーブルについては、敷設や引上げが頻繁に行われることがないので、ほぼ2ヶ月ごとに引き上げる捕集材の係留とは共存可能と考えられる。

以上の条件をまとめると、以下のようになる。

- ・係留水深は100m～200m。
- ・漁具の定置海域を避ける。
- ・領海内に係留する。

そこで、海上保安庁の海底地形図、漁具定置箇所一覧図、海図に基づいて、上記の条件を満足する海域を図19～24に示した。具体的な海域と、おおよその広さは以下のようになり、海域の総面積は6680km²となる。

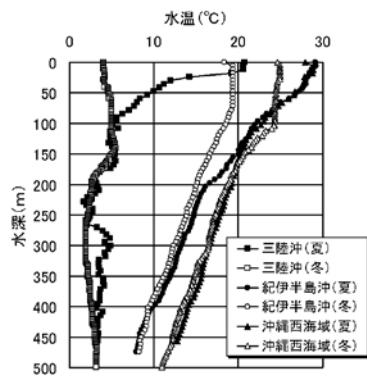


図18 海水温の鉛直分布の観測例 (海上保安庁のデータ)

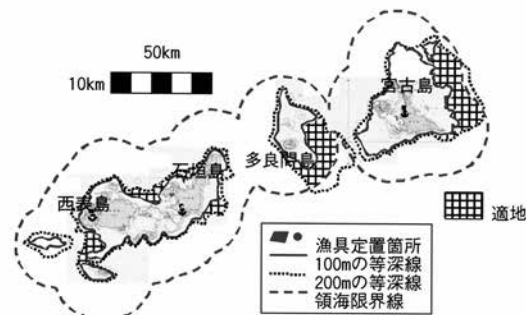


図19 西表島～宮古島周辺の適地

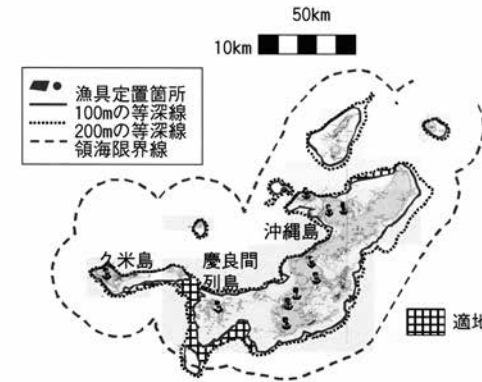


図20 久米島・慶良間列島・沖縄島周辺の適地

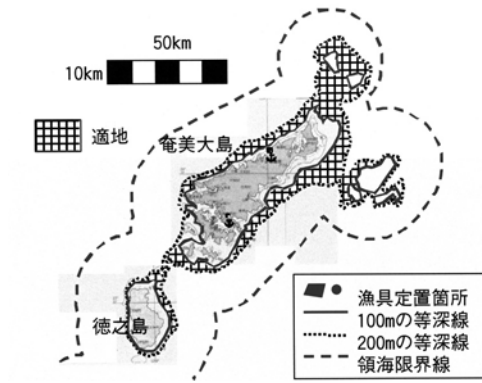


図21 徳之島・奄美大島周辺の適地

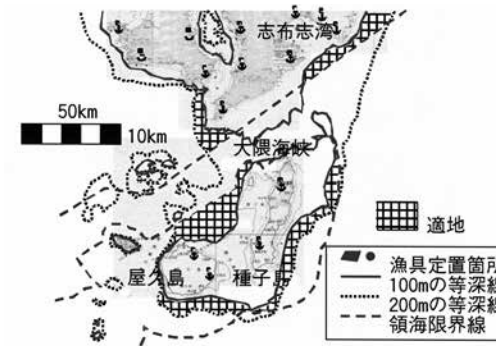


図22 屋久島・種子島・大隈半島周辺の適地

西表島の南西	100km ²
西表島と石垣島の間の北側	100km ²
石垣島の東	80km ²
多良間島の東と南東	300km ²
宮古島の東と北東	400km ²
慶良間諸島の北西～南西と南東	300km ²

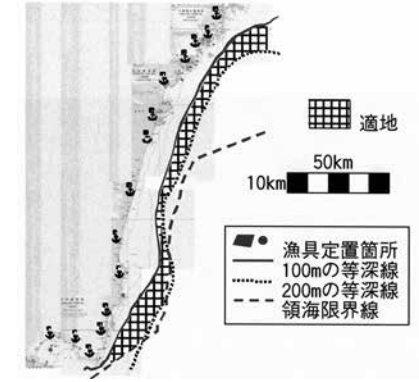


図23 日向灘の適地

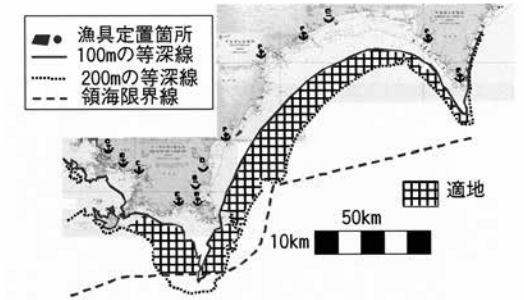


図24 土佐湾の適地

沖縄島北部の西	100km ²
奄美大島の周囲	1000km ²
屋久島の南と北	700km ²
種子島の東	350km ²
鹿児島湾口沖	150km ²
志布志湾口沖	100km ²
日向灘	1000km ²
足摺岬沖～土佐湾	2000km ²
合計	6680km ²

6. まとめ

海水中のウラン資源を効率的に捕集する技術の開発のため、モール状捕集材を作製して海洋試験を行なった。その結果、ポリエチレン糸を基材として、放射線グラフト重合の反応時間を5時間とすることで、100%のグラフト率が達成され、2.8mmol/g-捕集材のアミドキシム基密度の糸状捕集材を得ることができた。合成過程では、繊維の強度は保持され、モール状捕集材への加工強度

下限である1g/dをクリアした。沖縄海域での捕集試験の結果、ウラン捕集量は、浸漬日数が約30日で1.5g/kg-捕集材となった。また、モールのループ長さは10cmが適していた。モール状捕集材を海底から立ち上げて係留するシステムにおいて、年間1200トンのウランを捕集するには、捕集材の長さを60m、係留間隔を8mとした場合、捕集材210万本を係留する必要がある、係留面積は134km²となると推定された。モール状捕集材を用いて海水ウランを捕集するのに適した海域は、南西諸島から土佐湾の水深100mから200mの領海内と考えられ、総面積は6000km²に達する。このように、モール状捕集材に関する作製法および係留システムの最適化を行なったので、今後はモール状捕集材を用いた海水ウラン捕集コストを試算する予定である。

参考文献

- 1) 武井毅, 最近の世界のウラン需給と市場動向, 原子力eye, 51(2) (2005) pp.54-59.
- 2) 海水ウラン捕集システムの開発進む, 月刊エネルギー, 37(5) (2004) pp.36-40.
- 3) R.V. Davies, J. Kennedy, R.W. Mcilroy, R. Spence, K.M. Hill, Extraction of uranium from sea water, Nature 203 (1964) pp.1110-1115.
- 4) 尾形昇, 海水からウランを採る(II), 日本海水学会誌 31 (1977) pp97-109.
- 5) 菅野昌義, わが国における海水ウラン採取研究の現状, 日本原子力学会誌 23 (1980) pp36-43.
- 6) 江川博明, マイクロポーラス型キレート樹脂の合

成と応用, 日本海水学会誌 41 (1988) pp.235-250.

- 7) 片貝, 瀬古, 川上, 斉藤, 須郷, アクリロニトリルとメタクリル酸との共グラフト重合不織布のアミドキシム化反応による吸着材の作成および実海域試験, 日本海水学会誌 53 (1999) pp.180-184.
- 8) N. Seko, A. Katakai, S. Hasegawa, M. Tamada, N. Kasai, H. Takeda, T. Sugo, and K. Saito, Aquaculture of Uranium in Seawater by a Fabric-Adsorbent Submerged System, Nucl. Technol. 144, (2003) pp274-278.
- 9) 須郷, 玉田, 瀬口, 清水, 魚谷, 鹿島, 海水ウラン捕集コスト評価と実用化に向けての技術課題, 日本原子力学会誌, 43 (2001) pp.1010-1016.
- 10) 堀, 斉藤, 古崎, 須郷, 岡本, 放射線グラフト重合により合成したアミドキシム樹脂の特性に対する酸およびアルカリ処理の効果, 日本化学会誌, 9 (1988) pp.1607-1611.
- 11) モール状捕集材による実海域有用金属に関する受託報告書: 日本原子力発電株式会社, 2002.
- 12) 片貝, 笠井, 玉田, 長谷川, 瀬古, 川端, 大沼, 武田, 須郷, 海水中有用金属捕集材実海域特性試験, JAERI-Tech, 2002-40, 2002.
- 13) 清水, 玉田, 瀬古, 坂口, モール状捕集材を用いた海水ウラン捕集システムの提案, 海洋開発論文集, 18 (2002) pp.737-742.
- 14) 清水, 坂口, 須郷, 玉田, 瀬古, モール状捕集材を用いた海水ウラン捕集システムの提案, 電力中央研究所報告, 共同研究報告U980202 (2003).
- 15) 伊福誠, 人工海藻による波・流れの制御と漂砂, 海岸工学論文集, 44 (1997) pp.536-540.

高温ガス炉 (HTGR) の炉心拘束機構に用いる C/C複合材の構造健全性に関する研究 Study on Structural Integrity of C/C Composite Using as Core Restraint Mechanism in HTGR

辻 延昌*	柴田大受**	角田淳弥**
Nobumasa Tsuji	Taiju Shibata	Junya Sumita
石原正博**	伊与久達夫**	
Masahiro Ishihara	Tatsuo Iyoku	

〔概要〕

高温ガス炉 (HTGR) は1000℃近い高温の冷却材を取り出せる原子炉であり、水素製造設備への利用が期待されている。冷却材の高温化に伴い、より高温となる炉心条件において燃料温度を許容温度以下に保つためには固定反射体ブロック間の間隙を狭め炉心をバイパスする冷却材流れを制限しなければならない。本研究は、冷却材流路を連成した3次元伝熱解析を実施し、高い耐熱性を持つ炉心拘束機構を開発してバイパス流れを厳しく制限しなければならないことを解析的に明らかにした。この炉心拘束機構として有望な候補材であるC/C複合材に着目し、最適厚さの設計および直交異方性材料のFEM応力解析によりC/C複合材製の耐熱性炉心拘束機構の実現可能性があることを示した。本論文は、2004年10月に韓国済州島にて開催された国際会議 (APCFS2004) で発表したレポートを和訳して紹介するものである。

1. ま え が き

高温ガス炉 (HTGR) は高温の冷却材を供給できることにより、水素製造設備および50%を超える高効率発電の熱源として注目を集めている¹⁾。HTGRは40年以上にわたって開発され現在は日本のHTTR, 中国のHTR-10が稼動中であり、米国と南アフリカでは実用炉の開発プロジェクトが進行している。最近の実用炉の概念の多くは従来の軽水炉に比べると出力は小さい代わりに高い固有の安全性を達成するモジュラー型HTGRと呼ばれる炉型である。高い固有の安全性とは、冷却材の強制循環が停止した場合でも燃料が許容温度を超えることがなくFPが放出される事態に至らないことと考えられる。一方、水素製造設備にとって冷却材温度は高い方が望ましく、例えば高い水素製造効率のためには950℃を超える冷却材温度が

期待される。このような状況から最近の設計においては燃料開発にかかわる課題の一つとして、冷却材の温度上昇に対応して炉心バイパス流れを減少させて燃料に流れる冷却材の割合を増やし燃料温度を抑制することに重点が移ってきている。C/C複合材は高温での安定性と高強度により、この課題を解決するための有力な候補材料である²⁾。

2. HTGR冷却材高温化の課題

将来のHTGRの代表的な炉構造の例を図1に示す。炉内構造物は黒鉛構造物と銅構造物から構成される。固定反射体ブロックは炉心を取囲むように配置され、その内面形状は炉心の六角柱ブロックの積層配置に合わせるように設計される。冷却材ヘリウムガスはクロスダクトから原子炉圧力容器に流入し、炉側部の流路を上昇して上部プレナム空間に達した後、下降流となって燃料ブロック

*富士電機システムズ(株) 発電プラント本部 原子力統括部 設計部

**日本原子力研究所 高温工学試験研究炉開発部

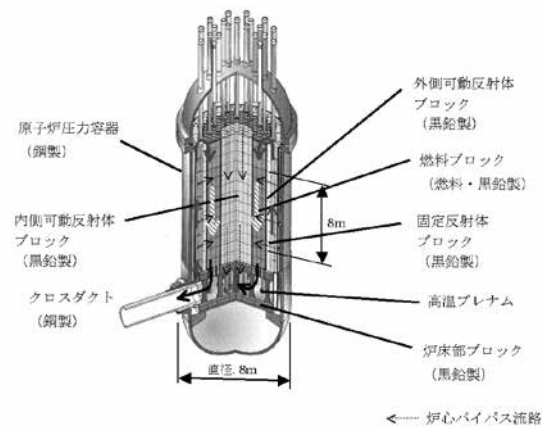


図1 将来HTGRの代表的な炉構造の例

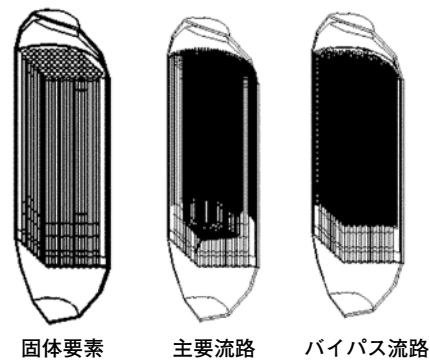


図2 伝熱解析モデル

表1 主要な解析条件

総発熱量	600MW
冷却材出口温度	850/ 950°C
冷却材総流量	315kg/s
冷却材圧力	7MPa

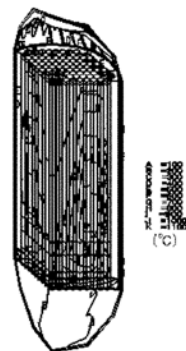


図3 解析結果—基準ケースの温度分布

の各冷却材流路孔を流れる。しかし一部の冷却材は炉心をバイパスして燃料を冷却せずに高温プレナムへ流れる。この炉心バイパス流れは全ての六角柱交換用ブロックの間隙や隣接固定反射体ブロックの間隙などが流路となる。冷却材出口温度を850°Cから950°Cに上昇させた場合でも燃料温度を許容温度以下に保つには燃料を冷却する冷却材を増やす必要があり、それゆえ炉心バイパス流れは減らさねばならない。

冷却材出口温度を950°Cとした場合に燃料温度を冷却材出口温度850°Cの場合と同等のレベルに維持するために必要な炉心バイパス流れの制限を定量的に評価する目的で、炉内構造物を対象として3次元120°セクターモデルによる伝熱解析を実施した。燃料ブロック、可動反射体ブロック、固定反射体ブロック、炉床部ブロック、コアパレル、原子炉压力容器は固体熱伝導要素でモデル化し、ふく射伝熱が主体となるブロック間、固定反射体-コアパレル間、コアパレル-原子炉压力容器間の間隙はふく射伝熱と等価な温度依存の熱伝導率を持ったダミー要素を挿入した。またモデルには主要な流路だけでなくバイパス流路も設定し、冷却材の圧力損失と流量分布も同時に解析した。解析にはFEM構造解析コードANSYSを使用した。解析モデルを図2に、主要な解析条件を表1に示す。

解析は冷却材出口温度850°Cおよび950°Cの場合について実施した。冷却材出口温度950°Cの場合には固定反射体ブロック間の間隙幅が0.2, 0.5, 1, 2, 3 mmのケースについて解析を行い、冷却材出口温度850°Cでは固定反射体ブロック間の間隙幅が3 mmの場合を基準ケースとして解析した。代表的な解析結果として基準ケースにおける温度分布を図3に示す。表2は各解析ケースにおける炉心流量割合、図4は各解析ケースにおける燃料ブロックの高さ方向温度分布を示す。炉心流量割合の最大値は固定反射体ブロック間の間隙幅が3 mmの場合では80%であるのに対し0.2mmの場合には90%近くにまで改善される。また、燃料温度は固定反射体ブロック間の間隙幅が狭まるにつれて低下する。図5は燃料温度の最高値と固定反射体ブロック間の間隙幅の関係を説明した図であ

表2 解析結果—炉心流量割合

炉心流量割合 (%)	冷却材出口温度 950°C					冷却材出口温度 850°C
	固定反射体間隙幅 0.2mm	固定反射体間隙幅 0.5mm	固定反射体間隙幅 1mm	固定反射体間隙幅 2mm	固定反射体間隙幅 3mm	固定反射体間隙幅 3mm
平均値	89.0	84.4	82.0	71.2	67.0	65.2
最大値	89.4	87.5	86.5	81.6	79.4	78.9

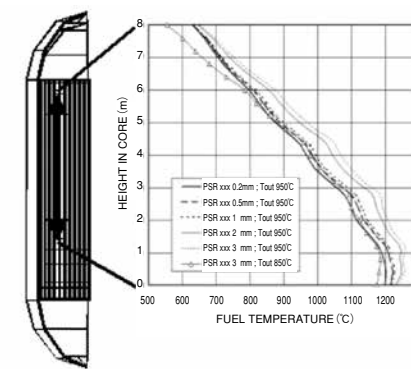


図4 解析結果—燃料ブロックの高さ方向温度分布

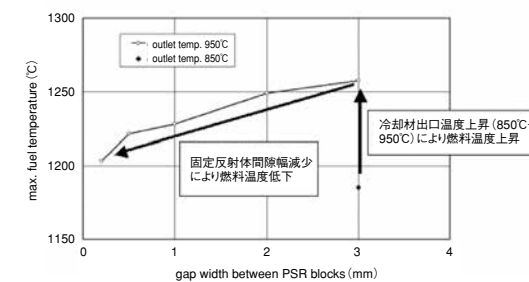


図5 解析結果—燃料最高温度と固定反射体ブロック間隙幅の関係

るが、冷却材出口温度を850°Cから950°Cに上昇させても燃料温度を許容温度以下に保つには炉心流量割合を80%から90%に改善しなければならないことがわかるが、この流量改善は固定反射体ブロック間の間隙幅を3 mmから0.2mmにまで狭めなければ達成できない。

この結果は、冷却材出口温度950°Cを達成するには隣接する固定反射体ブロック間を間隙が開かないように締付ける炉心拘束機構が必要であることを示している。日本原子力研究所のHTTRでは

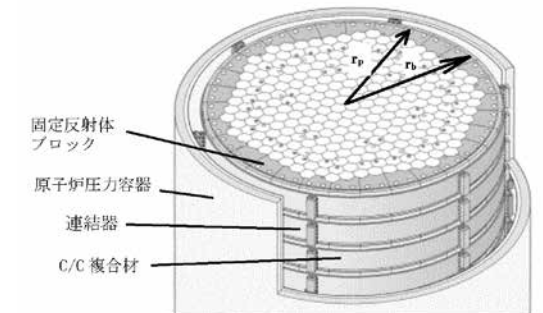


図6 C/C複合材製炉心拘束機構の構造案

固定反射体ブロックを締付ける炉心拘束機構として金属製バンドを採用して冷却材出口温度950°Cを達成した。しかし現在のHTGRの設計では発電効率を向上させるために冷却材入口温度が600°Cと上昇しており、入口温度が400°C程度であるHTTRとは異なり金属製バンドは高温でのクリープのため使用できない。このような状況において、C/C複合材のような耐熱材料が炉心拘束機構の有望な材料として注目されている。

3. HTGRにおけるC/C複合材製炉心拘束機構

炉心拘束機構には以下の機能が要求される。

- (a) 原子炉の全寿命期間にわたって固定反射体ブロックの間隙が開かないように十分な締付力で締付けられること。
- (b) 地震が起きた後でも固定反射体ブロックの間隙が開かないように十分な締付力で締付けられること。
- (c) 拘束機構の材料と固定反射体の熱膨張差により生じる張力により、固定反射体ブロックやC/C複合材に過度な荷重がかからないこと。

炉心拘束機構としてのC/C複合材の健全性を評価する目的で、図6に示すようなタガ状のC/C複

合材製炉心拘束機構を想定した。幅0.8mのC/C複合材は周方向6分割されて連結器により結合され、連結器はキー構造で原子炉圧力容器により周方向の変位を拘束される。

機能要求(a)はC/C複合材の高温クリープ特性に依存する。C/C複合材の繊維自体はクリープしないと考えられており、張力が十分に低いレベルであればC/C複合材はクリープしないと考えるとも良いと思われる。機能要求(b)については、地震後に摩擦力で打ち勝って固定反射体ブロックの間隙を閉じるには固定反射体各段につき約50kNの張力が必要である。機能要求(c)の成立性を検討するために東洋炭素により製造されたPANベース平面繊維であり、2800℃で熱処理したC/C複合材銘柄CX-270Gについて解析を行った。拘束機構の材料と固定反射体の熱膨張差により生じる張力は下式より計算される。図6において張力 F_1 は固定反射体の反力 F_r と釣り合う。

$$F_1 = F_r$$

$$F_1 = \{(\alpha_p \Delta T_p - \alpha_b \Delta T_b) - \frac{\Delta \lambda}{\lambda_b}\} E_b t_b$$

$$F_r = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_b} E_p t_p$$

- α : 熱膨張率
- E : ヤング率
- T : 定常運転時の温度
- $\Delta T = T - \text{室温}$
- t : 荷重のかかっている幅
- l_b : C/C複合材の長さ
- Δl : C/C複合材の伸び
- 添字b : C/C複合材
- 添字p : 固定反射体ブロック

計算に使用した数値は表3のとおりである。

表3

固定反射体		C/C複合材	
α_p	$4.2 \times 10^{-6} (/^{\circ}\text{C})$	α_b	$0.2 \times 10^{-6} (/^{\circ}\text{C})$
E_p	9.1 (GPa)	E_b	81 (GPa)
T_p	600 ($^{\circ}\text{C}$)	T_b	510 ($^{\circ}\text{C}$)
r_p	3.5 (m)	r_b	3.75 (m)
		l_b	$= 2\pi r_b$

C/C複合材の厚さを変えて、張力、固定反射体の圧縮応力、C/C複合材の引張応力を計算した結果を表4に示す。C/C複合材の熱膨張率が非常に小さいので機能要求(b)による必要張力50kNはC/C複合材の厚さ1mm以上で満足する。固定反射体の圧縮応力が黒鉛材の許容応力15MPa以内になるのはC/C複合材の厚さが50mm以下である。C/C複合材の引張応力がCX-270Gの許容応力140MPa以内になるにはC/C複合材の厚さが10mm以上でなければならない。したがって、C/C複合材の厚さは10-50mmの範囲で設計されるべきであることが明らかとなった。

また、繊維方向と張力方向のオフセット角の効

表4 計算結果—C/C複合材の厚さと応力

C/C複合材の厚さ (mm)	炉心拘束機構張力 (kN)	固定反射体圧縮応力 (MPa)	C/C複合材引張応力 (MPa)
1	185	0.92	185
2	355	1.77	178
5	790	3.95	158
10	1338	6.68	134
20	2047	10.23	102
30	2486	12.42	83
50	3002	15.00	60

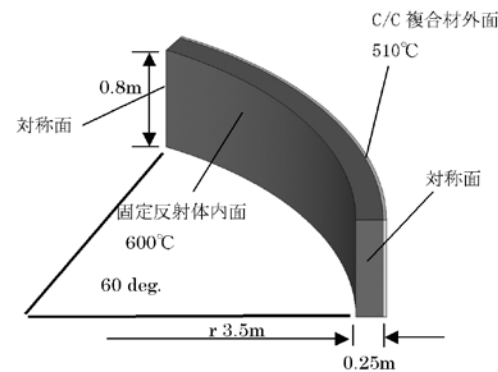


図7 C/C複合材の応力解析モデル

表5 C/C複合材の物性値

C/C複合材の物性値	繊維方向オフセット角	
	0°	90°
熱伝導率 (W/m℃)	129	26
熱膨張率 (/℃)	0.2×10^{-6}	9.5×10^{-6}
ヤング率 (GPa)	81	3.4
ポアソン比	0.1	
厚さ	30mm	

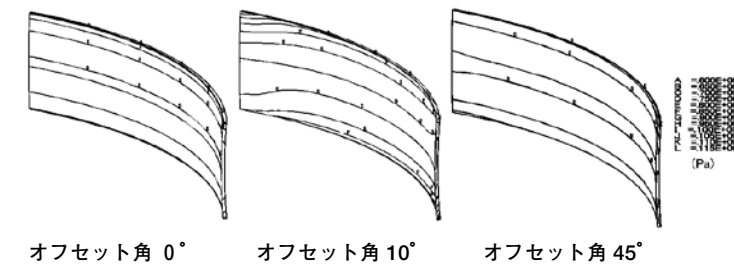


図8 解析結果—C/C複合材の最大主応力 (S1) 分布

果を評価するため解析コードANSYSを使用してC/C複合材製炉心拘束機構の応力解析を実施した。解析モデルを図7、解析に使用したC/C複合材物性値を表5に示す。解析結果としてオフセット角が0°、10°、45°の場合のC/C複合材内の最大主応力分布を図8に示す。C/C複合材の中央付近の引張応力はオフセット角が増加するにつれて減少するが、端部の引張応力は0°から10°に増加する間に高くなることが明らかとなった。

4. 結 論

HTGRの炉心の流路を含めた伝熱解析により、冷却材出口温度の高温化には、固定反射体ブロックの間隙を厳しく閉じるために耐熱性炉心拘束機構の開発が必要であることが明らかとなった。ま

たC/C複合材が次世代HTGRの炉心拘束機構にとって有望な材料であることが最適厚さの設計と予備的なFEM応力解析により示された。今後C/C複合材について、クリープ、中性子照射効果や連結器ボルト結合部の破壊などの重要な現象を解明し、構造設計基準を確立していく予定である。

本報告は、文部科学省からの受託事業「高温ガス炉固有の安全性の定量的実証」の成果の一部である。

参考文献

- 1) M. Richards et al., paper ID : N6P350, NUTHOS-6 Nara, Japan (2004)
- 2) M. Eto, S. Ishiyama, K. Hukaya, T. Saito, M. Ishihara, S. Hanawa, JAERI Research 98-3 (1998)

3次元構造に対する1次応力評価手法の開発

The Study on Evaluation Method for Primary Stress of 3-D Structure

定 廣 大 輔* 柴 本 宏** 長 島 英 明**
 Daisuke Sadahiro Hiroshi Shibamoto Hideaki Nagashima
 笠 原 直 人*** 井 上 和 彦**
 Naoto Kasahara Kazuhiko Inoue

〔概要〕

原子力機器で採用されている「解析による設計」では、構造物中の応力を1次応力と2次応力に分類した上で制限する。軸対称構造物に対しては特定断面での応力分布を線形化处理して1次応力を評価しているが、3次元形状では評価断面の設定が難しく、これに代わる1次応力評価法が望まれている。今回、1次応力は応力再配分を生じないという特徴に着眼した1次応力の評価方法を提案したので、以下のとおり紹介する。なお、本稿は、2004年度日本機械学会年次大会で報告した内容を紹介するものである¹⁾。

1. はじめに

実用高速炉を開発すべく、核燃料サイクル開発機構/日本原子力発電(株)/電気事業者を主体に「実用化戦略調査研究」が進められている。実用高速炉では、経済性向上のためにループ数削減などの設計合理化が図られ、それに伴って大型化した蒸気発生器(SG)には、図1に示す強度的に有利な3次元形状の球形管板を採用している。

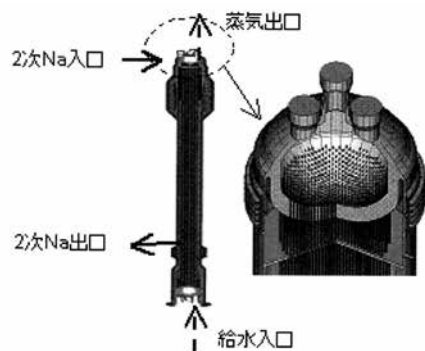


図1 実用高速炉でのSG概念

通常、液体金属冷却型高速炉の機器は、低圧条件下で使用されるが、SGの水・蒸気系と接する部位では内圧が高い。このようなことから、1次応力を適切に評価することが必要となる。

原子力機器の設計に採用されている「解析による設計」では、延性破断、過大な非弾性変形、疲労破断などの破損モードへの影響の違いから構造物中の応力を図2のように分類して制限している。

軸対称構造物に対しては、図3に示すように特定断面での応力分布の線形化处理により応力分類が行われている。1次応力は外力との釣り合いに

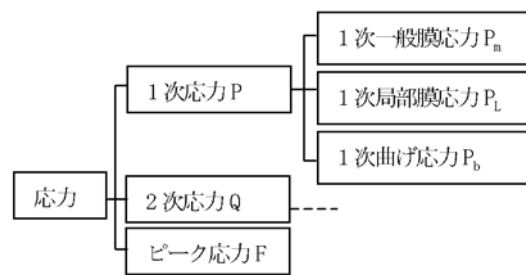


図2 「解析による設計」での応力分類

よって部材内に生じる応力であり、これが材料の引張強さや降伏応力を超えると、破断や崩壊に至る可能性がある。このため従来の設計では、高応力部に評価断面を設定し、断面に沿った応力分布の線形化处理から求まる応力の膜成分と曲げ成分をそれぞれ制限することによって、引張力や曲げモーメントによる破損の防止を図ってきた。

しかしながら、球形管板などの3次元構造物は、評価断面の設定が難しく、応力分布の線形化处理による応力分類が困難な場合が考えられる。この場合、構造不連続部などにおいて、機械荷重により生じるが2次応力に分類すべき応力成分と、1次応力との分類も困難となる。

このような場合に対しても、適切に1次応力を制限するために、従来法のような評価断面を用いた応力分類が不要な1次応力評価法が望まれている。本研究では、1次応力は応力再配分を生じないため、外力との釣り合いを示す位置(骨格点)が存在するという特徴に着眼した1次応力評価法を紹介する。

2. 評価法の考え方

1次応力は、非弾性挙動などの材料特性によらず、外力との釣り合いにより一義的に決まる荷重制御型応力である。一方、2次応力は変位制御型応力であり、周囲の拘束などにより構造物内での応力再配分が生じる。

1次応力と2次応力の違いを、図4に示す。

上記の1次応力の特徴に着眼した評価法として、GLOSS (Generalized Local Stress Strain) 法がある^{2)~4)}。GLOSS法では2回の弾性解析を実施する。1回目の弾性解析では、構造物内に均一

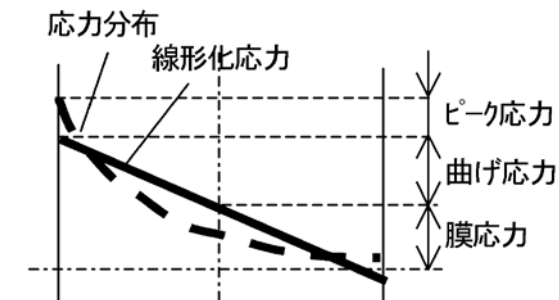


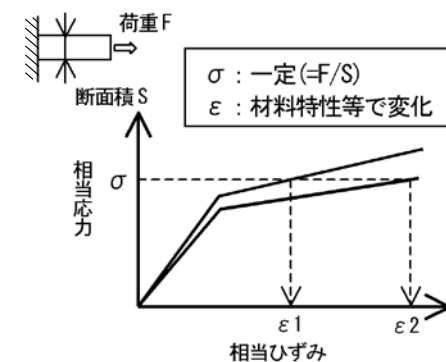
図3 応力分布の線形化处理の概念

な縦弾性係数を使用する。2回目の弾性解析では1回目の弾性解析の応力分布に基づき、2次応力成分に応力再配分を生じさせるために、縦弾性係数を修正(高応力部で割り下げ)する。

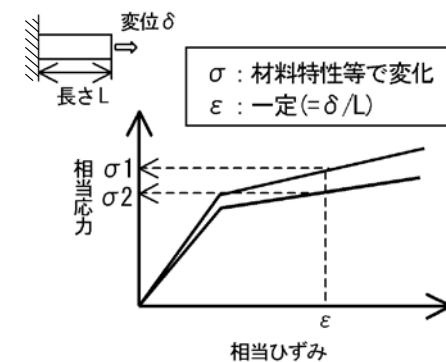
1次応力は再配分が生じないため、1回目と2回目の弾性解析結果を構造物全体で比較すれば、応力の変化しない位置(骨格点)が存在する。この位置の応力(骨格点応力)は外力(機械荷重)と釣り合う応力を示し、1次応力に分類される。

本研究での1次応力評価法は、上記のGLOSS法を発展させたものであり、基本的な考え方はGLOSS法と同様である。

骨格点応力は、内圧やモーメントあるいはその組合せに対して、これらの外力と釣り合う応力であるため、1次応力制限の指標となるとともに、上記のとおり評価断面を用いずに評価可能である。このため、骨格点応力を用いることで、従来のような応力分布の線形化处理による応力分類は不要とでき、評価断面を用いずにFEM解析によ



(a) 1次応力の特徴



(b) 2次応力の特徴

図4 1次応力と2次応力の違い

*富士電機システムズ(株) 原子力統括部 設計部

**日本原子力発電(株) 研究開発室

***核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

る応力分布のみから1次応力を評価することが可能と考えられる。

なお、本稿では、1次応力である骨格点応力の評価方法を示しており、骨格点応力を用いた1次応力の制限については今後の課題である。

3. 骨格点応力の評価手順

骨格点は、解析的に構造物内に応力再配分を生じさせた場合に、応力が変化しない位置として求められる。

GLOSS法では、解析的に応力再配分を生じさせる手段として縦弾性係数を修正している。この方法では、応力再配分は縦弾性係数による制約を受けることになり、特に2次応力成分が大きい場合には、骨格点を適切に評価するために複数回の反復計算が必要と考えられる。

このような背景から、本検討では構造物全体に十分に応力再配分を生じさせる手段として、弾塑性解析を用いることを考えた。1次応力は弾性範囲内で設計されるが、本評価法では弾塑性解析によって強制的に応力再配分を生じさせることで、骨格点を同定する。2.に示したとおり、1次応力は材料特性などによらず一義的に決まる応力のため、弾塑性解析の実施に当っては、非弾性構成式などに注意を払う必要はなく、汎用コードのデフォルト機能を用いるだけでよい。

具体的な評価手順は、以下の通りである。

- ①弾塑性解析を実施する。この時、降伏応力 S_{y1} は構造物内で応力再配分が生じるように、材料特性によらず小さな値を使用する。
- ②降伏応力を S_{y2} に変更し、再度弾塑性解析を

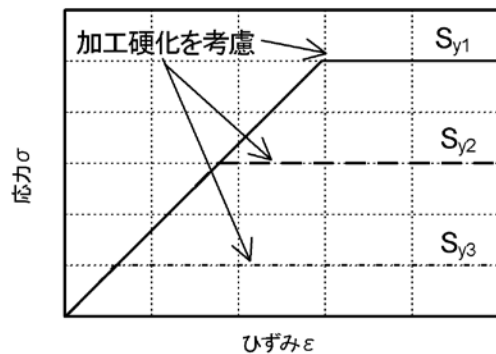


図5 非弾性構成式

実施する。

- ③上記の2つの弾塑性解析の結果により、応力が変化しない位置およびその位置の応力を評価する。

2次応力に分類される応力は再配分するため、①と②の応力分布から応力が変化しない位置の応力が骨格点応力となる(手順③)。

なお、本研究では、非弾性構成式として、図5に示すような縦弾性係数の1/10,000の加工硬化係数を考慮した2直線モデルを用いている。

4. 試解析例

3.の評価法を用いて、下記を目的に試解析を実施した。

- ①単純モデル解析；評価法の妥当性確認
- ②実機構造モデル解析；

評価法の実機構造への適用性確認と、評価断面を用いない1次応力評価法の検討

4.1. 単純モデル解析

図6に示す厚肉円筒に内圧を荷した体系で、試解析を実施した。2次応力との分類が確認できるように、内圧と同時に板厚方向の温度勾配による熱応力も負荷するものとした。

非弾性構成式は図5に示した2直線モデルを用い、降伏応力を10, 30, 50MPaと変更した場合の応力変化を調べた。なお、本評価法では2回の弾塑性解析により骨格点の同定が可能と考えられるが、本検討では評価法の検証のために、3回の弾塑性解析を実施し、すべての応力分布が1点で

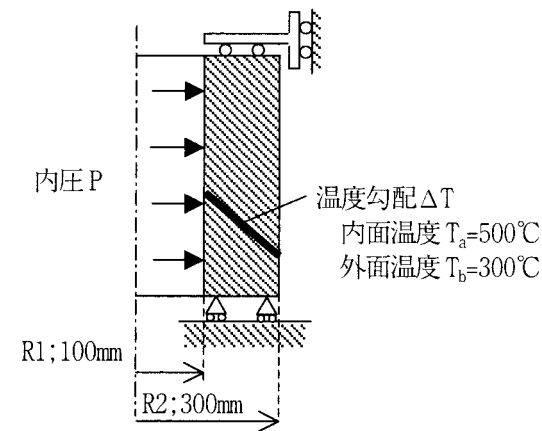


図6 厚肉円筒モデル

交わることを確認するものとしている。

図7に示すように、異なる降伏応力を用いた解析により得られた応力分布は1つの交点を有することが確認された。この交点が骨格点であり、得られた骨格点位置および骨格点応力は理論解ともよく一致した。

このことから、提案した評価法により1次応力が適切に評価可能な見通しを得た。

4.2. 実機構造モデル解析

図8に示す球形SG管板の一部を部分的に取り出したSG管板部分モデルに対して、試解析を実施した。評価断面を用いない評価法を検討するた

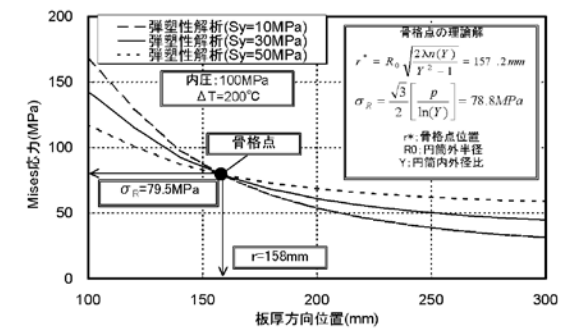


図7 厚肉円筒モデルでの解析結果(例)

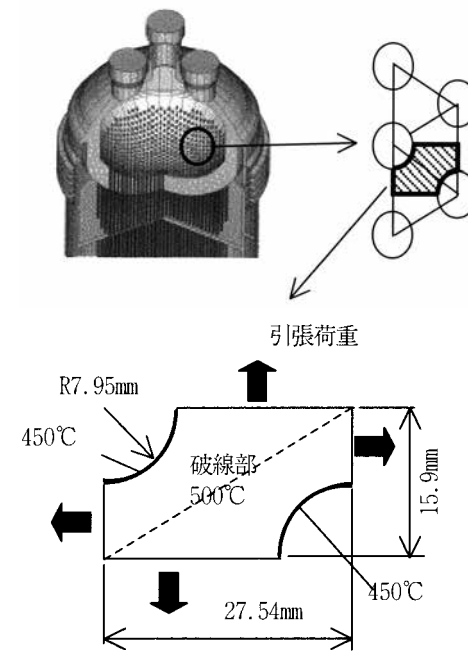


図8 SG管板の部分解析モデル

めに、まずは2次元体系での解析としている。

材質は、実用高速炉のSGで使用予定の12Cr系鋼を想定した。解析で使用した12Cr系鋼の主要物性値は、表1に示すとおりである。

荷重条件としては、実機使用条件を考慮して内圧による機械荷重に、熱荷重を考慮した。1次荷重は、内圧により生じる周方向応力を模擬して、引張荷重により負荷し、2次応力としてはナトリウムあるいは蒸気の温度勾配による熱荷重を負荷した。非弾性構成式は、図5に示した2直線モデルを用い、降伏応力を10, 20, 30MPaと変更した場合の応力変化を調べた。

なお、4.1.の場合と同様に、本検討においても3回の弾塑性解析を実施することとしている。

解析結果の例として、図9に特定断面での応力分布を示す。

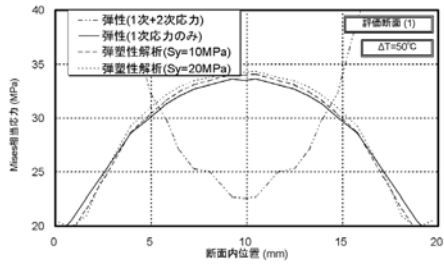
図9に示したように、本評価法により実機構造物に対しても骨格点が得られることが確認された。また、骨格点以外の位置では、降伏応力の変更により、応力値が変化する結果となっている。

この結果により、構造物中での応力変化量(解析では各節点での応力変化量)を評価すれば、評価断面を設定しなくても骨格点の同定、つまり1次応力の評価が可能と考えられる。また、骨格点は応力分布の交点であり、その近傍では応力変化の符号が反転するため、応力変化の符号を評価することでも骨格点の同定が可能と考えられる。

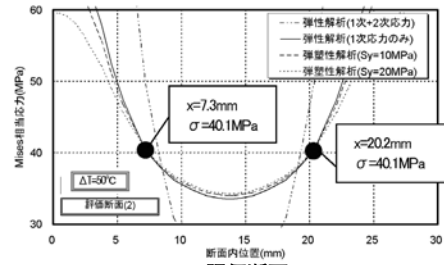
図10に、(a)応力変化量のコンター、(b)応力変化の符号のコンターを示す。骨格点は、図10(b)では応力変化の符号の正負の境界部となり、図10(a)では応力変化量が1%以下(暫定)の領域と評価した。骨格点位置は図10(a)および(b)ではほぼ一致しており、このようなコンターから骨格点位置と骨格点応力が評価可能な見通しが得られた。

表1 解析に使用した12Cr系鋼の主要物性値

項目	値	備考
縦弾性係数	$E = 174,000 \text{ N/mm}^2$	500°C での値
ポアソン比	$\nu = 0.302$	
熱膨張係数	$\alpha = 11.2 \times 10^{-6} \text{ mm/mm/}^\circ\text{C}$	
熱伝導率	$\lambda = 32.7 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$	



(a) 評価断面(1)



(b) 評価断面(2)

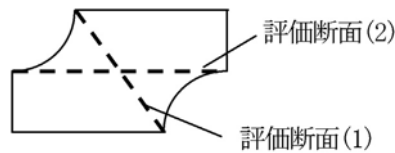
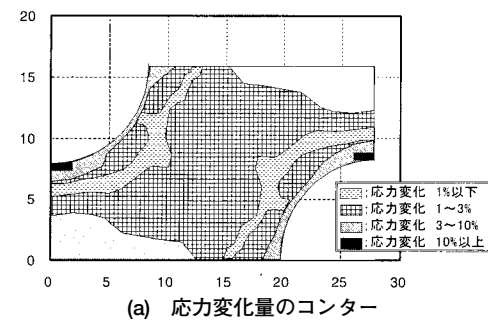
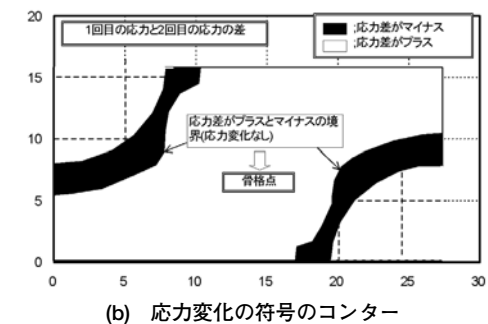


図9 SG管板モデル解析での応力分布例



(a) 応力変化量のカウンター



(b) 応力変化の符号のカウンター

図10 SG管板モデルでの応力変化カウンター

5. ま と め

研究成果は以下の通りである。

① 1次応力は再配分が生じないという特徴に着目した1次応力評価法を提案し、その適用性を見通しを得た。

② 応力変化量や応力変化の符号による評価断面を用いない1次応力評価法を提案した。

今後は、3次元構造に対する解析を実施し、評価断面を用いない評価法について継続して検討する予定である。

6. お わ り に

ここで紹介した開発の内容は、平成15年度に日本原子力発電(株)が経済産業省から受託して実施した研究成果の一部をまとめたものです。

本研究の実施に当って、有益なご助言をいただいた高速炉開発関係メーカー殿の各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 定廣他, “3次元構造に対する1次応力評価手法の開発”, 日本機械学会 2004年度年次大会 講演論文集Vol.1, p.263~264
- 2) R. Seshadri, C. P. D. Fernando, “Limit Loads of Mechanical Components and Structures using the GLOSS R-Node Method”, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.114, pp.201-208, 1992
- 3) R. Seshadri, “The Generalized Local Stress Strain (GLOSS) Analysis – Theory and Applications”, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.113, pp.219-227, 1991
- 4) R. Seshadri, D. L. Marriott, “On Relating the Reference Stress, Limit Load and the ASME Stress Classification Concepts”, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol.56, pp.387-408, 1993

構造ヘルスマonitoringシステムの開発

Development on Structural Health Monitoring System

熊谷 仁志*
Hitoshi Kumagai

【概要】

構造物にセンサを取り付けて、そのデータを分析し、供用期間中における健全性診断を行うことを「構造ヘルスマonitoring」と呼んでいる。清水建設(株)では、センシング、データの伝送・管理、健全性の評価・診断まで一貫した「構造ヘルスマonitoringシステム」の開発を行っている。今回はその中から、構造ヘルスマonitoringに適したFBG型光ファイバセンサ、ならびに遠隔地からでも簡単に利用できるインターネットを活用したデータ管理システムについて紹介する。

1. ま え が き

原子力発電プラントは多数の機器から構成される大規模なシステムであり、運転を支援するためにさまざまなモニタリングシステムが採用されている。一方、近年になって土木・建築分野においても維持・管理の重要性が認識され、特に建設物の柱や梁などの骨格部分(以下、構造あるいは構造物という)について、経年劣化に対する健全性診断や地震に対する損傷診断をいかに効果的に行うかが議論されている。

構造物にセンサを取り付けて、そのデータを分析し、供用期間中における健全性診断を行うことを「構造ヘルスマonitoring」と呼んでいる。ここでは清水建設(株)が開発している「構造ヘルスマonitoringシステム」とその適用例の一部について紹介する。

2. 構造ヘルスマonitoringの背景と目的

これまで土木・建築構造物の経年劣化に対して疎かにしていたわけではない。図1に示すように、通常的环境下では構造物の経年劣化は緩やかな速度で進行するため、1~数年に一度、点検を行えば適切に対応することができた。しかしながら高

度経済成長期に大量に建設された構造物について、補修あるいは建替をしなければならない時期が近づいており、さらに建設当初に想定していなかった荷重の増加(例えば交通荷重の増加など)により一部の構造物では疲労が進行していることも顕在化してきた。これら既存の構造物のヘルスマonitoringに関しては技術的に難しい点も多いが、このような背景から今後建設される構造物に関してヘルスマonitoringを行うことの有効性について理解が深まってきている。

一方、1995年に発生した阪神淡路大震災や昨年の新潟県中越地震では、多くの構造物に被害が認められた。筆者らは、地震後の構造物の状態をい

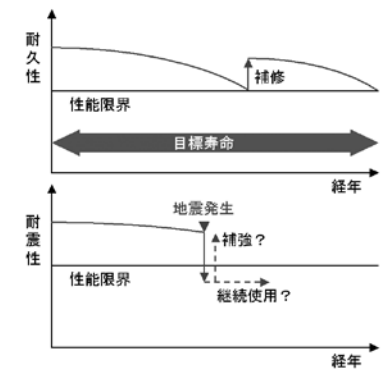


図1 耐久性・耐震性の経年変化

*清水建設(株) 技術研究所

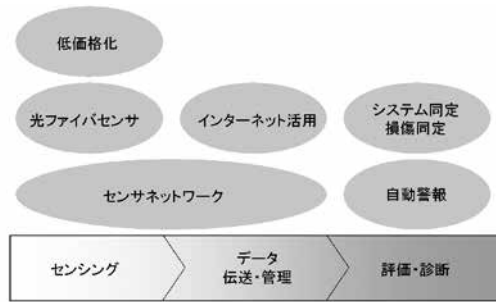


図2 構造ヘルスマニタリングの開発領域

ち早く知ることによって継続使用の可否を迅速に診断し、損傷があった場合はデータに基づいて適切な補強を施すことが重要であると考えており、利用者にとって使いやすかつ価値の高い「構造ヘルスマニタリングシステム」の開発を目指している。

3. 構造ヘルスマニタリングシステムの構成

構造ヘルスマニタリングには①センシング、②データの伝送・管理、③健全性の評価・診断の3つのステップがあり、筆者らはこれら全体を一貫したシステムとして提供したいと考えている。そのために図2のような領域について研究開発を行っている。

(1) 普及型センシング

土木・建築は大型構造物であり、センサの必要数も多くなる。構造ヘルスマニタリングを普及するためにはセンシングの低価格化が鍵である。

(2) 土木・建築構造物用光ファイバセンサ

構造ヘルスマニタリングに用いるセンサには、長寿命、高安定性、長距離伝送性が要求される。光ファイバセンサはこれらに合致したセンサであり、多点型 (FBG)、分布型 (BOTDR) センサの開発を行っている。

(3) インターネットを活用したデータ管理システム

構造物の場所に行かなくても、遠隔地から迅速にデータが閲覧でき、専門技術者でなくとも容易に利用できるシステムとして、インターネットを用いたデータ管理システムを開発している。

(4) システム同定、損傷同定プログラムの開発

センサによって得られたデータから、健全度や損傷を診断するプログラムを開発している。

今回はこれらの中からFBG型光ファイバセン

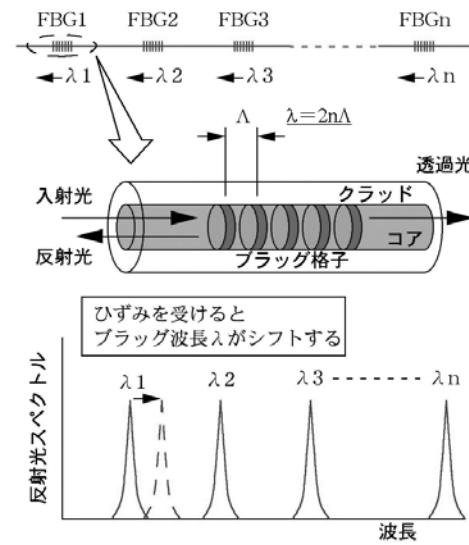


図3 FBG光ファイバセンサの計測原理

サ、ならびにインターネットを活用したデータ管理システムについて紹介する。

4. FBG型光ファイバセンサ

FBG型光ファイバセンサ (Fiber Bragg Gratingの略、図3参照) は、通信用光ファイバの心線部分 (コア) にブラッグ格子と呼ばれる微細な縦縞模様を入れたもので、縦縞部分での反射光の波長が縞の間隔に比例する性質を利用し、対象物のひずみを計測するシステムである。従来は航空宇宙や機械工学の分野で用いられていたが、そのまま建物に適用すると耐久性などに問題があったため、変形、ひずみなどの計測モジュールを新たに開発した。

ここでは、図4のような地上12階建の大学研究施設に光ファイバセンサを適用した事例を紹介する。同建物は鉄骨構造であるが、一部 (間柱接合部パネル) に極低降伏点鋼という強度が低くかつエネルギー吸収能力の高い鋼材が使用されている。したがって地震時の変形は接合部パネルに集中するようになっているため (制震ダンパ)、図4に示すように接合部パネルの変形に着目してモニタリングを行っている。

12個のサーボ型加速度計と、12個の変位計 (前述の接合部パネルに設置)、44個のひずみ計、8

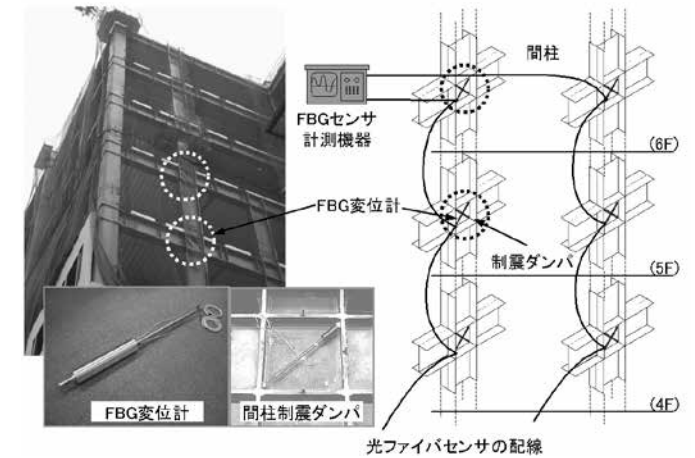


図4 FBG光ファイバセンサの適用事例

個の温度計、合計64個のFBG型光ファイバセンサが設置されており、一つの建物にこれほどのセンサを用いた構造ヘルスマニタリングは稀有である。FBG型光ファイバセンサでは波長帯を変えることで1本の光ファイバ上に複数のセンサを多重化できるが、ここでは1本に最大6個のセンサモジュールを設置することで、配線の簡素化を図っている。

同建物は2001年に完成し、幸いにしてこれまで接合部パネルなどに損傷が生じるような地震は経験していないが、継続してモニタリングを実施している。

5. インターネットを活用したデータ管理システム

インターネットを活用したデータ管理システムは、対象構造物に設置する観測・通信システム、データセンタに設置するデータ管理サーバ、ならびにユーザのパソコンで構成されている。データの流れを図5に、システムの構成を図6に示す。

個々の構造物に設置された加速度計、変位計、ひずみゲージなどのセンサの信号は、構造物の観測システムで収録および1次処理された後、ADSLなどの通信接続サービスによってデータ管理サーバに自動転送され、サーバ上で観測点・観測項目ごとにデータベース化されている。管理者などのユーザは任意の観測点の必要なデータを、インターネットブラウザを用いて容易に確認でき

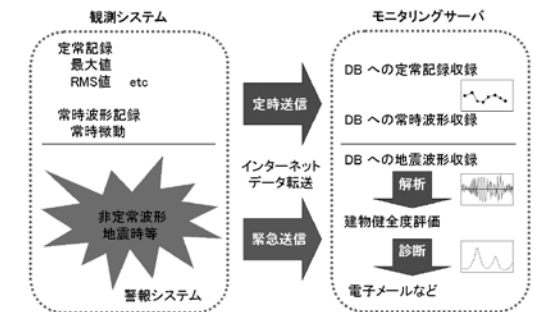


図5 モニタリングデータの流れ

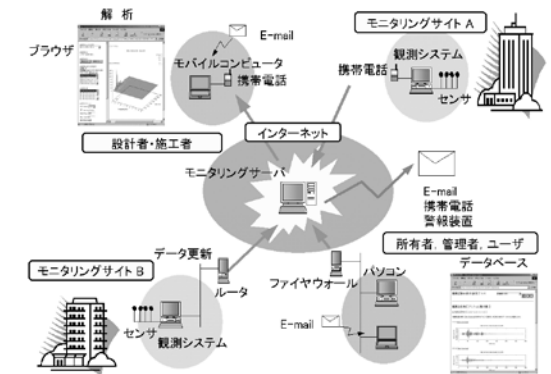


図6 モニタリングシステムの構成

る。地震時などの緊急時には、時々刻々の応答観測値が直ちに管理サーバに自動転送され、あらかじめ設定しておいた応答の閾値と比較し、閾値を超えた場合にはブラウザ上の画面表示を変えて警報を発するのに加えて、電子メールによって管理者などに自動通報する仕組みとなっている。暗号

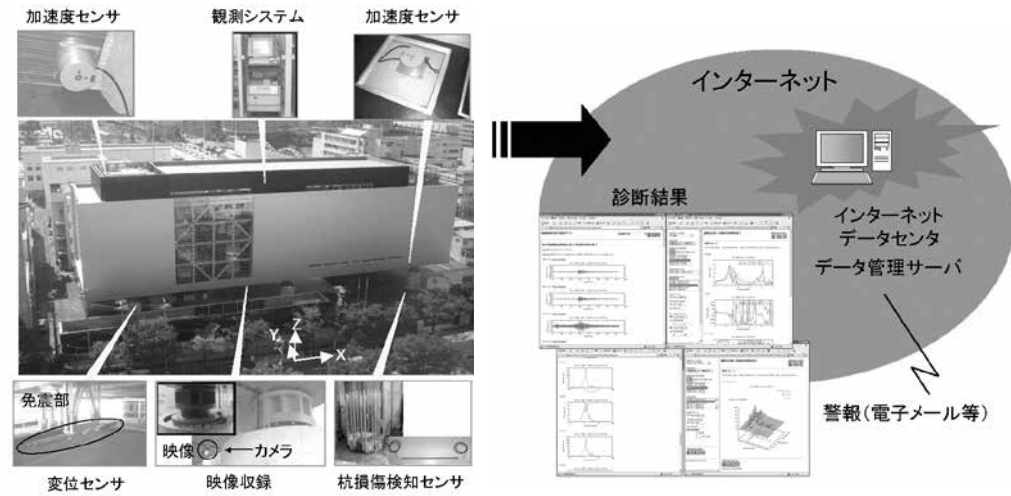


図7 清水建設株式会社技術研究所における構造ヘルスマonitoringシステム

化やユーザ認証などのセキュリティシステムも組み込まれておりデータの安全性も確保されている。

このようにして、従来は地震後直接建物に向き、時間をかけて目視点検により把握していた構造物の健全性が、遠隔地から瞬時に診断できるようになった。ここでは清水建設株式会社技術研究所の新本館に適用した事例を紹介する。

同建物は、地上6階建の免震構造であり、図7に示すように1階の6本の鉄筋コンクリート造柱の上に、各1基ずつ鉛プラグ入り積層ゴムを設置し、その上に2階から5階までの鉄骨構造が載っているユニークな構造になっている。

25個の加速度計、2個の変位計（免震装置に設置）、1個の温度計、およびインターネットカメラ（免震装置を撮影）が設置されている。これらのデータは最上階の計測システムで収録、1次処理され、通信回線を介してインターネットデータセンターのデータ管理サーバに転送される。毎日2回2分間の計測を行った結果がデータベースに追加され、建物の定常的な変化を把握することができる。一方、加速度計の値がある閾値を超えると地震記録モードとなり、時刻履歴波形が収録され、自動的に応答スペクトルなどが計算される。電子メールで警報を受けた管理者は、パソコン上でこれらの解析結果を閲覧することができるようになっている。

6. あとがき

最近、従来の仕様規定型の設計法から、性能評価型の設計法に移行しつつある。性能評価型設計法では、構造物の目標性能を設定し、その目標を達成するように設計が行われる。基本的に設計方法は設計者に任されることになり、設計の自由度が向上するが、例えば地震時において本当に目標どおりの性能を発揮したのかを実証していくことが重要である。構造ヘルスマonitoringシステムは、こうした視点からも重要な技術として位置づけられることになるであろう。

最後に本開発に際して貴重なご指導をいただいた、東京大学新領域創成科学研究科 武田展雄教授、日本女子大学住居学科 石川孝重教授、慶応大学システムデザイン工学科 三田彰教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Keiji SHIBA et al., Structural Health Monitoring Systems for Smart Structure, Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering (2004), pp.27-32
- 2) 熊谷仁志, 光ファイバセンサを用いたモニタリング技術, コンクリート工学2003年1月号, pp.146-149

施設管理システムの紹介 Facility Management System Promotion

阿邊川仁* 鈴木美和**
Hitoshi Abekawa Yoshikazu Suzuki

〔概要〕

富士通株式会社では施設管理システムを開発・販売して四半世紀を経過した。本稿では導入実績豊富な施設管理システム（システム名：Futuric/B）の紹介を濫澤倉庫株式会社導入システムを通して紹介する。また施設管理システムにもオープン化傾向が強くなってきている。2003年10月にISO規格として承認されたプロトコルのBACnet対応システムニーズが高まり、設備機器側もインテリジェント化が進みLonWorks®対応製品が増えてきている。このたび富士通株式会社では、このBACnetおよびLonWorks®に対応した施設管理システム（システム名：Futuric/SX）を開発・製品化しラインアップに加えた。本稿では新たに開発した施設管理システムにおける機能概要や各装置の特徴などについても紹介する。

1. はじめに

施設管理システムは、ビルや工場、大学、駅舎などさまざまな建物の設備機器の監視・制御の自動化を目的とし開発された。一般的に5,000m²（5階建）以上のビルなどには100%設置することが義務づけられている。

施設管理システムは、施設内の建築設備の監視制御業務の省力化を図るとともに、施設の管理や運営に係わる事務作業効率化に貢献する。電気、空調、防災、防犯などの各設備ごとにサブシステムを設けておりその各サブシステムとの通信をインターフェイスにて実施している施設管理システムが富士通株式の「Futuric/B」（写真1）である。



写真1

2. 「Futuric/B」のシステムの特徴

施設管理システム「Futuric/B」のシステム特徴を以下に記す。

- ・センターLAN上にマンマシン装置（HIS：Human Interface Station）と分散処理装置（DPS：Distributed Processing Station）を配置した水平分散型アーキテクチャを採用して危険分散、負荷分散を実現。
- ・中枢装置のマンマシン装置（HIS）が2台ある場合は相互バックアップ機能を持たせているため1台停止時などにもう一台にて設備監視や個別操作を継続できる。
- ・OAデスク+キャビネットにマンマシン装置や分散処理装置を設置することにより省スペース化を実現。
- ・テナント名称や各間仕切などの変更をユーザ開放としてシステムを運用しながらデータ変更もできる。
- ・メッセージウィンドウ表示により今まで全て印刷してきたものを必要なものだけ印刷して余分なペーパーを削減しコストダウン化を実現。

*富士通株式会社 パブリックセキュリティソリューション本部 システム・コンストラクション事業部 第二SI部

**濫澤倉庫株式会社 不動産営業本部 不動産部

3. 澁澤倉庫(株)システム導入事例

3.1. システム導入の背景

澁澤倉庫(株)では平成16年4月東京都江東区に新しいオフィスビルの「澁澤シティプレイス永代」を竣工した。澁澤倉庫(株)では新築ビル構築にあたり働く場所というだけでなく人と環境に十分な配慮がなされた建物でなくてはならないという意識を構想時より強く持っていた。また、環境負荷の軽減についてもでき得る限りの省エネルギーを実現する施設管理システムとして富士通(株)の「Futuric/B」を選択した。

3.2. 澁澤倉庫(株)のシステム

澁澤倉庫(株)では前述した新築の「澁澤シティプレイス永代」と東京都中央区日本橋茅場町に所在する「澁澤シティプレイスA棟」とを専用線にて接続しており永代にて統合管理も可能である(図1)。

永代、A棟両ビルにおける施設管理システムの導入により電力や空調などの設備に対して一定の時間帯および人員不在時にその場所の電源を切るなどのエネルギープログラムを構築できる。また自動コントロールを行なうなどのシステムを最大限に利用した運用を実施することでより効率的な

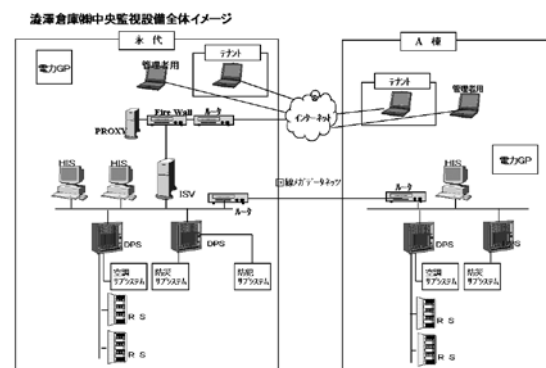


図1 澁澤倉庫(株) 施設管理システム構成

エネルギーの低減が可能となっている。

3.3. 各テナントへの機能提供

各テナントへの提供機能としてFuturic/Bは、残業発生時に空調運転の延長を各パソコンで申請し、サーバ装置を経由し通知する「残業運転申請」と、各テナントブロックごとの温度設定を通知する「温度変更申請」を有している。従来は書類で申請していた作業をオンライン化することにより資源(紙)の削減と設備管理業務において大幅な省力も実現できる(図2)。

3.4. 澁澤倉庫(株)でのFuturic/B導入効果について

このシステムを導入し、効率的な運用をすることにより澁澤倉庫(株)ではビル全体のエネルギー削減率10%を目標としている。オフィスビルにおける10%削減というのは環境対策として大きな成果といえる。

4. Futuric/SXについて

富士通(株)は、ISO規格となったビルディングオートメーションシステム(BAS)の世界標準プロトコル(BACnet)^(注1)と、ローカルフィールドのデファクトスタンダードであるLonWorks^(注2)を採用した新たな施設管理システム(Futuric^(注3)/SX)を開発した。

5. Futuric/SX開発の背景

BACnetは、米国ASHRAE^(注4)が主体となり標

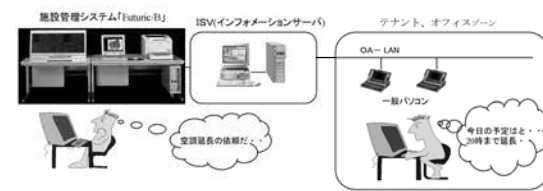


図2

(注1) A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networksの略で、ビルオートメーション用プロトコル。

(注2) Local Operating Networkの略で、米国ECHELON社が開発したI/Oの機能やネットワーク通信機能などを持つNeuronチップを利用した、知的分散制御ネットワークの総称。

(注3) Fujitsu Total control and supervise system for Facilities and Utilities of URban infrastruCtureの略

(注4) American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineersの略で、米国暖房冷凍空調工業会のこと。

(注5) American National Standards Instituteの略で、米国規格協会のこと。

準化されたプロトコルで、1995年にANSI^(注5)/ASHRAE 135-1995 BACnetとして規格化された。これをきっかけに、世界各国でこのBACnetプロトコルを採用したシステムが誕生し、実績を作ることで評価され、2003年10月にはISO規格として承認された。

日本国内では、電気設備学会が主体となり、BACnetを参考に日本独自の標準規格の検討が始まり2000年にBAS標準インタフェース仕様(IEIE-P-0003:2000)が学会規格となった。しかし、BACnetとの互換性がなく、かつ、BACnetがISO規格となり、世界的に普及が広まってきていることから、電気設備学会ではBAS標準インタフェース仕様をBACnetと互換性が保たれるように2002年に仕様の改定(IEIE-P-0003:2000-a)がされた。

国内市場においては、従来のIEIE-P-0003:2000にかわり、このBACnetと互換性があるIEIE-P-0003:2000-aによる施設管理システムが2003年度より導入されようとしている。

6. 開発の課題

BACnetは各装置間の基本的な通信インタフェースを規定しているプロトコルである。

このBACnetプロトコルを用いて、具体的な施設管理システムの複雑な機能を実現させるためには、これらのサービスとオブジェクトをどのように組み合わせて利用するかを各メーカーと調整する必要があった。また、初期のBACnetプロトコルには、日本特有の電力監視機能(電力デマンド監

視・制御、非常用発電機による余裕電力制御など)を実現する手段がなくこれらをどう解決するかが課題であった。

7. 開発内容

今回の開発では、6章で述べた課題を解決するため、事前に接続試験を行い詳細仕様を固めた。また、原則BACnetプロトコルによる開発を進めたが、BACnetで実現できない電力監視機能については、IEIE-P-0003:2000-aの仕様を利用することで実現した。

7.1. システム概要

施設管理システムは、ローカルフィールド、オペレーション/インテグレーションフィールド、クライアントフィールドの3つのフィールドに分かれ、ヒューマンインタフェース装置(HIM)、インテリジェントコントローラ(Icont)、リモートステーション(RS-LON)、インフォメーションサーバ(ISV)の4つの装置から構成される。

図3に代表的なシステム構成図を示す。

本システムは、RS-LONより取り込んだ接点情報をIcontにて収集し、Icontは、その情報をBACnetプロトコルに変換し、HIMに送信する。HIMでは、受信した各種情報を加工し、管理者にディスプレイ画面や音声などで通知するものである。また、HIMではディスプレイ画面よりオペレータ操作にて設備機器の発停操作や設定操作をすることにより、その情報をBACnetプロトコルに変換し、Icontに送信することでRS-LONからの制御/設定信号を出力することができる。

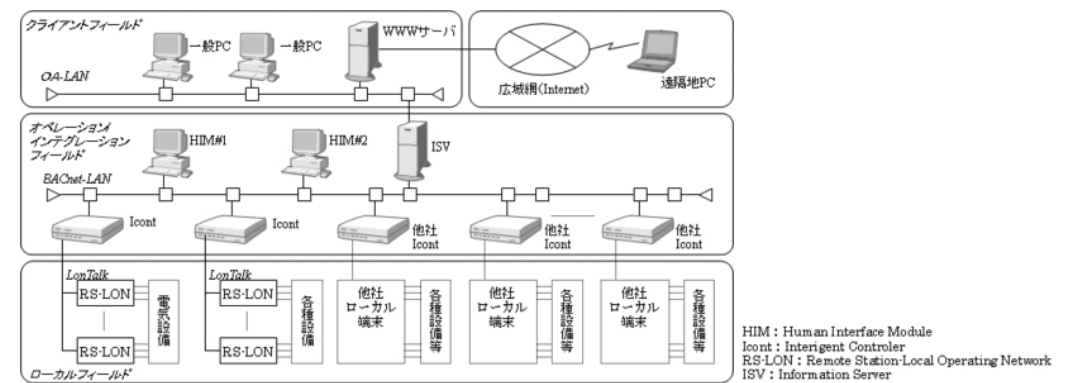


図3 システム構成図

各装置の主な役割と従来システムとの違いについて次項以降で述べる。

7.2. ヒューマン・インタフェース装置 (HIM)

1) 装置概要

HIMは、オペレータ操作をサポートする装置で、警報通知、発停/設定制御操作や電力デマンド監視などができる。また、各種アプリケーションにおけるパラメータの設定もここからする。

写真2にHIM画面表示例を示す。

2) 特徴

BACnetは通信手順とデータ型を規定したプロトコルのため、各メーカーごとにそのプロトコルの使い方や容量などが異なる。さらに、HIMはさまざまなメーカーのIcontと接続されるため、この違いを基本的にはサポートしなければHIMとしての運用ができなくなる。そのため、HIMの開発では、メーカーごとの違いを吸収できるように、メーカー別フラグをデータに持たせ、アプリケーション側で処理を分けるようにソフトウェア開発を行った。これにより新たなメーカーと接続する場合でも、容易に対応が可能となった。

7.3. インテリジェント・コントローラ (Icont)

1) 装置概要

主にRS-LONとHIM間のインタフェース的役割を担う。BACnetインタフェースとLonTalk^(注6)インタフェースの2つのプロトコルをサポートし

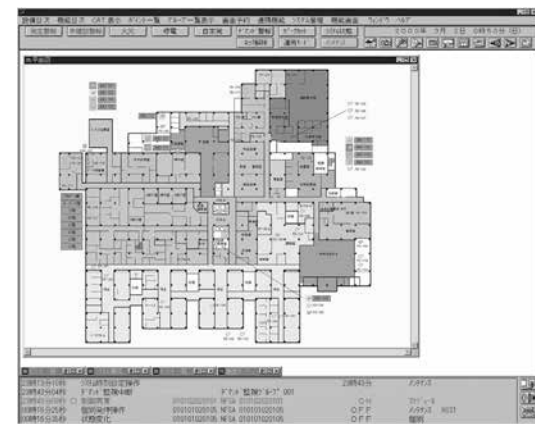


写真2

ているゲートウェイ装置である。

また、デマンド監視やスケジュール・イベント制御などを独自に行い、HIMがダウンしても自立分散制御が可能な仕様となっている。

2) 特徴

ローカルフィールドにおけるオープンプロトコルとしてLonTalkプロトコルを採用。さまざまなメーカーのLonWorks対応製品との接続が容易に可能な仕様となっている。

このIcont開発でも、さまざまなメーカーのLonWorks対応製品と容易に接続ができるように、端末ごとに種別フラグを持たせ、種別フラグによりアプリケーション処理を変更できるように開発した。これにより、新たな端末と接続する場合でも、データ変更や比較的軽微なアプリケーション変更で対応が可能となる。

7.4. 端末装置 (RS-LON)

1) 装置概要

現場設備からの接点情報を取り込みLonTalkプロトコルによりIcontに対し各種情報の送受信をする。

写真3にRS-LON装置外観を示す。

2) 特徴

富士電機のMICREX-SX^(注7)シリーズを採用し、Icont装置との接続におけるLonTalkプロトコルの標準機能を開発した。このRS-LONは、他のLonWorks製品に比べ一つの装置で大量のIO情報の送受信が可能である。今回のRS-LONの開発では、富士電機と協力し、大量のIO情報を効率良く伝送することを主眼とし、ファンクションファイル (FP) の設計をした。

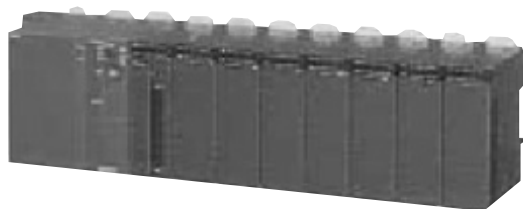


写真3

(注6) LonWorksのネットワークプロトコル。99年10月にANSI/EIA709.1として規格化。

(注7) 富士電機機器制御(株)が開発したプログラマブルコントローラ。

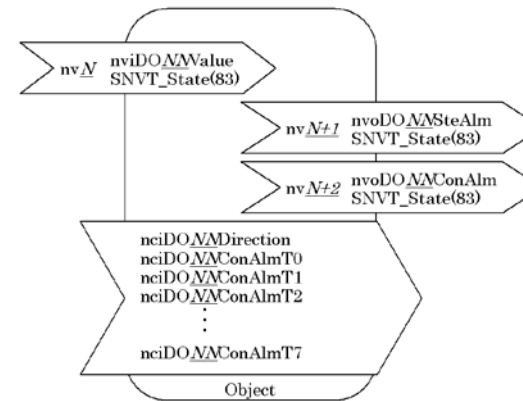


図4 デジタル出力 (DC) ユニットFP例

図4に制御出力 (DO) ユニットFP例を示す。

また、MICREX-SXはIOユニットの実装が自由なため、実装タイプごとにLONのファンクションファイル (FP) やRS-LONのCPUプログラムを作成する必要がある。そこで、これらのデータを効率良く設計できるようにツールの独自改良をした。

7.5. インフォメーション・サーバ (ISV)

1) 装置概要

ISVは、HIMやIcontと連携し、時系列データの蓄積・演算・解析によるエネルギー管理を行ったり、OA-LANとBA-LANのインタフェース装置として、OA端末からの空調延長申請や温度設定変更操作ができる機能を有している。(この機能は澁澤倉庫(株)にも導入済) また、これらの申請データをさらにデータベース化することでテナント管理や課金処理などが可能である。

2) 特徴

従来は、データの収集や端末への制御についてもHIM経由でしかできなかったが、BACnetインタフェースを独自に設けることにより、ISVより直接Icontにデータを収集したり、設定できるようにした。これにより、1分や10分といった短周期データを長期に渡り蓄積できるようになり、従来難しかった短周期トレンドによるエネルギー解析や長期間のデータによる統計解析が可能となった。

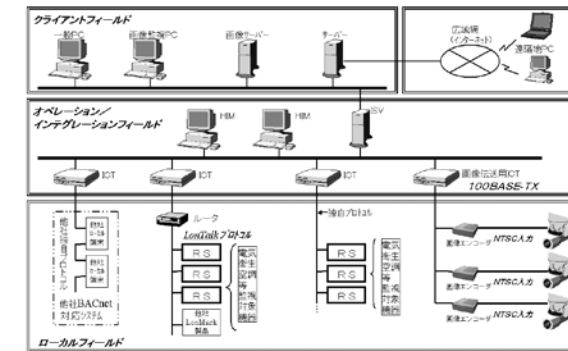


図5

8. む す び

今回の開発でBACnetプロトコル対応の製品が整い、他サブシステムとのインタオペラビリティが確立された。LonWorks対応IcontやBACnet対応のISV製品などローカルフィールドおよびクライアントフィールドの両方における標準装置を準備することで、さまざまなシステムとの接続が可能な環境が整った。

しかし、BACnetは現在も拡張されつつあり、弊社もこの拡張に合わせ機能拡充を行い、さらに信頼性、利便性、拡張性を追及していく必要がある。

図5に某所に納入した複合システムの概略例を示す。これは、各フィールドを持ち、施設管理システムと防犯システムとマルチメディアシステムが一体となったシステムである。今後はこのような、さまざまシステムとの連携が可能な複合システムとしてのニーズが高まってくると予想される。

参考文献

- 1) 富士時報 2002 VOL 75 「コントローラのビル管理システムへの適用」
- 2) BAS標準インタフェース仕様書 (IEIE-P-0003:2000) (社)電気設備学会
- 3) BACnetTMビルディングオートメーション用データ通信プロトコル (社)電気設備学会
- 4) FUJITSU ACCESS REVIEW 通巻19号

石炭価格高騰等で有利となる原子力発電

The Advantages of Nuclear Power in the Wake of the Soaring Prices of Coal

田邊 敏憲*
Toshinori Tanabe

〔概要〕

わが国化石燃料源の中で最もウエイトの高い石炭火力発電のコストが、長年の原子力発電と並ぶ低水準から2倍化している。これは、中国要因などで原油と同様に世界的な需給逼迫が続く見通しの石炭の約四半世紀振りの価格高騰が背景にある。期待される新エネルギー利用も、今後益々激化予想の台風・豪雨・洪水など気候変動が、その不安定要因となる可能性が高い。21世紀に入りこうしたグローバルなエネルギー・環境情勢が激変する中で、資源制約・地球温暖化防止・コスト面での原子力発電の有利さが改めて認識されつつある。

今こそ関係者は、この有利さを活かすべく、原子炉周りの技術的安全性はしっかりと確保されてきた実績とともに、安心に対する国民の信頼回復に向けて説明責任を果たすことが求められる。

1. はじめに

原子力発電を取り巻く地球規模のエネルギー・環境情勢は、21世紀入りとともに激変している。一つは、自然環境を含めた資源価格の高騰であり、もう一つは地球温暖化問題の激化である。いずれも原子力発電の優位性を高めている。

昨年は原油価格が1バレル50ドル台に突入したが、今次局面では、石油に比べ埋蔵量が豊富なこともあって第二次石油危機以降一貫して低位安定してきた石炭のスポット価格も、近年の水準に比べ2～3倍化した(20～25ドル/トン→53～60ドル/トン)事実が重要である。また1ポンド当り10ドル前後で推移していたウラン価格も、同18ドルを超えるなど20年振りの高水準となっている。

さらに石油危機時と異なり、中国の“初めてのエネルギー危機”に象徴されるように、今回は初のグローバルなエネルギー危機でもある。これは、世界経済のパラダイム(ものの見方)が30年前の石油危機当時とは全く変わりつつあることを意味する。それが原油価格1バレル50ドルという現象として顕現化したものと捉え得る。

原油50ドル台乗せの理由として、中国での需要

急増、供給サイドで圧倒的に豊富な埋蔵量を有するイラクなど中東情勢の不安定化、メジャーの開発投資不足問題、さらには世界的なカネ余りを背景とした投機筋の資金流入などが挙げられた。特に石炭価格の2倍化には、中国の半端ではない石炭需要の増大見通しが大きく影響している。

では、30年前の石油危機時に比べて世界経済は何が変わったのか。「人口増加」および「旧共産圏の崩壊(真のグローバル市場経済化)とIT化による労働・財市場のグローバル単一化」に集約できる。

世界人口は、第一次石油危機の73年当時は約40億人で、うち旧共産圏諸国人口は約1/3だった。その後、旧共産圏諸国が冷戦終結(ソ連〈91年12月消滅〉、東欧〈89年11月ベルリンの壁崩壊〉、中国〈78年改革開放政策〉)などに伴い市場経済へ移行したため、現在では世界人口の64億人全体がグローバル市場経済下にある。

この結果、世界的規模で労働力としてのヒトの価値(賃金)に絶えず中国・インドなどアンカー国への鞆寄せ圧力が働く一方、ヒトの生存や経済成長に不可欠な資源などの財には需給タイト化により絶えず価格上昇圧力が働くという構造が出現

した。

かかる二重構造ゆえに、世界経済のインフレリスク論議が活発化する一方で、高率の失業あるいはデフレからの脱却政策から抜け出せない国も多いという構図を生んでいる。

このように21世紀に入り、エネルギーや地球環境情勢、さらには世界経済の枠組みが20世紀とは様変わりしているが、これら要因の原子力発電にもたらす影響をみてみよう。

2. 資源価格の高騰

2.1. 石炭価格2倍化

昨年原油価格が一時1バレル50ドルを突破し、その後も不安定な動きにあるが、実は埋蔵量が豊富で約四半世紀の間低水準で推移してきた石炭価格も、高騰している。総じてこれら希少資源の国際価格は、中国経済が高度成長軌道に乗るのに合わせ、21世紀に入って2倍前後に上昇している。原油・石炭・ウランなどエネルギー関連のみならず、例えば中国では水やその代理変数たる穀物(栽培に小麦などで1000倍もの大量の水が必要)、綿花なども軒並み上昇している。

こうした資源価格の水準切り上げは、各国の産業構造へ確実に影響を及ぼしつつある。日本は石油危機を契機に徹底的な省エネ技術開発などを推進し世界に冠たる国際競争力を獲得したが、再び

競争力を高める好機が到来しつつあると考える。

資源エネルギー庁の2000年試算(燃料源別、稼働率80%、99年価格)を前提に、高騰した石油(原油価格1バレル50ドル)、石炭(99年39ドル/トンの2倍に上昇)の発電コストを算出してみる(表1)。化石燃料源の中でウエイトの高い石炭火力発電のコストは、2000年のkWh当り6.5円から12.7円(1ドル=110円、稼働率を実勢並みの40%と仮定)に上昇する。これは水力発電(13.6円)並みの高さで、長年原子力(5.9円)と並び日本の低コスト発電を保証してきた「石炭火力の支柱」が危うくなることを意味する。

一方、石油火力発電コストは、kWh当り10.2円から、同じく稼働率補正後では34.4円とほぼ限界的な電源となる。また石油価格と連動する天然ガス(LNG)価格も上昇するため、LNG発電コストも6.4円から稼働率補正後で20.1円となる。

ウラン価格も1ポンド当り10ドル前後から2倍程度に上昇しているが、その全体のコストに占める比率は約3%(加工コストと合わせて30%)と、化石燃料発電の燃料費比率60%に比べごくわずかなウエイトのため、原子力発電コストにほとんど影響しない。仮にバックエンドコストを織り込んでも、大きくみてkWh当り0.6円の追加コストアップゆえ、唯一kWh当り7円前後の低コスト電力ということになる。

表1 資源高時代の発電コスト試算値

	単位	資エネ庁試算値 (2000年)	試算値		
		1998年運開ベース	バレル\$35ケース	バレル\$50ケース	
原油CIF価格	\$/bbl	12.8	35	50	
一般炭CIF価格	\$/t	39.0	60	80	
通関レート	¥/\$	128	110	110	
火力稼働率	%	80	40	40	
発電コスト	石炭火力	¥/kWh	6.5	11.0	12.7
	石油火力	¥/kWh	10.2	29.1	34.4
	LNG火力	¥/kWh	6.4	17.0	20.1
	原子力	¥/kWh	5.9		
	水力	¥/kWh	13.6		
	太陽光	¥/kWh	65.8(94万円/kW)→18.9(2010年27万円/kW)		
スト	風力	¥/kWh	23.4-13.9(大規模)		
	廃棄物発電	¥/kWh	12.5-8.6(大規模)		

(出所)湯原哲夫 東京大学大学院教授

*株式会社通総研 経済研究所

2.2. 石炭価格高騰は中国要因を反映

特に石炭価格の高騰は、より直接的には中国の膨大な石炭需要見通しが背景にある(表2)。

電力不足が深刻化している中国の発電能力は、2000年の3.2億kW(日本は2.3億kW)に対して、当局者が昨年9月の世界エネルギー大会において示した見通しは、2020年には石炭火力発電能力のみで7.8億kWという衝撃的なものである。必要な石炭消費量は年間31億トン(標準炭換算では21.7億トン)に達するが、2002年見込みの世界の石炭生産量合計38.4億トン(輸出量6.4億トン)に比べて、いかに膨大な量かが理解できる。すでに深刻な煤煙、酸性雨問題などが一段と激化することにもなる。

一方中国の石炭生産量は、2003年に16.8億トンと史上最高を記録した。しかし、2002年以降、国内の石炭需要の急激な増加により、豪州に次ぐ年間9000万トン前後の石炭輸出国であった中国の輸出量は頭打ちとなった。

2003年になると、輸出用コークスに回す石炭が

表2 中国の将来エネルギーの動向(1)

・2020年総エネルギー消費、発電能力と二酸化炭素排出予測(周大地能源研究所長、#19WEC、2004年9月-COAL TOPICS)

	2020年消費量	石油換算(Mtoe)*1	二酸化炭素(億C-t)*2	発電能力(億kW)
石炭	31億t	2,015(1,270)	21.8(13.7)	7.8
石油	6.5*3	650	5.5	
天然ガス	1.7	220	1.4	0.7
合計		2,885(2,140)	28.7(20.6)	11.0

*1 石炭発熱量を6500kcal/kg(無煙炭ベース)

*2 CO₂排出源単位は石炭1.08、石油0.84、天然ガス0.64Mt-c/Mtoe。亜炭4.100kcal/kgの場合を括弧内に示した。

*3 2020年輸入量は石油4.5億t

(出所)湯原哲夫 東京大学大学院教授

表2 中国の将来エネルギーの動向(2)

・国土資源部、石炭埋蔵量を発表(2004年6月24日)

中国の石炭埋蔵量(億トン)	埋蔵量	基礎埋蔵量	資源量	合計
	1,886	3,317	6,872	1兆190

①埋蔵量:基礎埋蔵量から各種損失分を控除した後の経済的に採掘可能な基礎埋蔵量

②基礎埋蔵量:現在の技術経済条件下で経済的に利用できる地下埋蔵量

③資源量:経済利用性に劣るか、もしくは経済意義が確定していない地下埋蔵量

④「BP Statistical Review of World Energy 2002」における中国石炭の確認可採埋蔵量は、1,145億トン、可採年数116年とされている。なお、世界総計は9,842億トン、227年としている。

(出所)湯原哲夫 東京大学大学院教授

足らず、豪州炭の輸入に頼らざるを得ない状況に陥った。2004年に入り、中国はこれまでの石炭輸出奨励策を、内需を優先させるべく廃止に向けて方向転換している。

2006年からの第11次5ヵ年計画にあわせて一段の生産能力拡大策が打ち出される見通しであるが、2010年頃には石炭輸出国から純輸入国(2.7億トン)となり、20年の石炭輸入量は9億トンにも達するといった予測が出されている。

こうした中国を軸とする世界のエネルギー需給見通しの大きな変化を踏まえると、多少の振れはあるとしても原油50ドル・石炭価格2倍化時代の到来は必至とみて、むしろこのエネルギー危機をチャンスに変える発想での日本の産業構造改革が重要となる。

かつて日本は、石油危機を契機に、天然ガスおよび原子力エネルギーの利用増大を推進した(一次エネルギー供給での両者のウエイトはそれぞれゼロから13%にまで上昇)。また各業界挙げての省エネ、省プロセスが推進され、気が付いてみると、日本の製造業は世界で最も効率的なエネルギー利用で高い国際競争力を獲得していた。

こうした経験を振り返ると、今次エネルギー危機を再びチャンスに変えることで、日本は21世紀に相応しい持続可能な産業社会システムを世界に先駆けて実現できることになる。

2.3. 日本経済への影響

そこで、こうした石炭火力発電などの価格変化が日本経済に与える影響をみってみる。想像以上に大きく、産業競争力のみならず家計などの可処分所得を大きく左右する。

直接影響を受ける電力については、各国が化石燃料の高騰によるコスト上昇圧力に直面する中で、日本の場合は相対的に原子力発電の比重が高いために料金は外国より抑えやすく、その分、国内の需要家のコスト競争力も相対的に改善される可能性がある。

そもそも電力業界の電源構成は、1973年の第一次石油危機後の30年間の対応でガラリと変わった。70年から2000年への電力会社の電源構成は、水力(22→8%)、石油(49→8%)、石炭(25→12%)、天然ガス(0→32%)、原子力(1→38%)

と大きく変化した。

こうした中、現在、電気・ガス業の自由化がスケジュール的に推進されている。電力会社の「オール電化」展開と、ガス会社の「オールガス化」展開とが激突しつつある。ちょうどこのタイミングで、原油50ドル・石炭価格2倍化時代が現実のものになったわけである。

電力とガス両業界の競争の帰趨については、電力が日本でウエイトの高い原子力発電の低コストを活かしつつ、コストアップする石炭、天然ガスという電源の効率をどの程度引上げ得るかが鍵を握る。他方で、天然ガスに関し国際的にみてもCIF価格比非常に高い末端価格を設定しているガス会社が、どのような合理化努力を伴った価格戦略を推進するのか、これによって需要サイドでの選択が決まってくるだろう。

化石燃料源全般の価格高騰に対し、電力やガス会社が合理化を含めていかに生産性を高め得るかは、日本の産業競争力のみならず個人部門の可処分所得にも大きく影響する。日本のこれまでの電力料金は欧米主要国に比べても(2002年)、kWh当り産業用で欧米の4~5米セント前後に対し11.5米セント、家庭用で同じく8~11米セントに対し17.4米セントと、2倍以上高かった。

この点、従来石炭火力や天然ガス火力の低コストが壁となり、それとの比較で割高のため普及が困難であった太陽光(kWh当り18.9円<2010年>)、風力(同23.4~13.9円)、廃棄物(同12.5~8.6円)、地熱、バイオマス(生物資源)エネルギーなど新エネルギーによる発電が大きく拡大する条件が整うことになる。それは、地域でこれら「地産地消型」の資源を活用した小口分散型エネルギー供給産業の台頭が展望可能となることも意味する。

こうして地域単位でエネルギーを自給できるようなクラスター、いわゆる「コモンズ(共有地など)」にあっては、その内部の価格体系は消費者と供給者がともに存在する、あるいは重なっているため、財・サービスの取引価格がオープンな通常の市場価格とは別に成立する点が注目される。

例えば地域の貴重なエネルギー資源となるバイオマスを利用した発電の電気料金は、仮に電力会

社でkWh当り20円強だとして、ここではコモンズのメンバーに利益追求の動機が希薄なこともあり10円で済む可能性もある。逆に、地元の雇用を生むと納得して、30円払う地域も出てこよう。全国的に拡がってきた「地域通貨」による価格の決め方も、こうした考えに基づいている。

したがって、各地域で工夫をこらしたエネルギー価格の設定により、後述のように新しい形の農水産業などその地域に相応しい産業構造を自ら作っていけることになる。

2.4. 産業間連携の進展

一方、産業界全体の行動も大きく変化する。まず化学や鉄鋼などエネルギー多消費産業の間で「産業間連携」の余地が広がる。「産業間連携」とは、企業や産業の枠を超えてモノ・エネルギーの融通を図り、その生産の最適化を目指す、加えてなるべく廃棄物を出さない産業コンプレックスのようなものの構築を目指すことである。産業間の連携で、省エネ、省資源を達成しエネルギーや資源のコストを下げることで稼ぐという“エネルギーコンビナート”的な構想である。

エネルギーコンビナートのプレーヤーとして期待されている鉄鋼業はすでにエネルギーの有効利用率が64~65%に達しており、「産業間連携」は、さらなる省エネ・省資源をもたらす。また化学産業では石油利用の多くの部分が熱としての利用に回されているが、熱は鉄鋼業から排熱の融通を受けることで、石油はプラスチックの素原材料利用に止め得ることになれば、最大のエネルギー多消費産業・化学の石油消費量は大きく節約される。

すでに日本では、企業単位の省エネ策はやり尽くしており、国際競争力を維持していくには、一企業、一産業の努力だけでは限度がある。したがって、省エネや省資源での「産業間連携」あるいは民生部門まで含めた連携を考えなければならない。熱のように産業部門で一番使えないエネルギーが民生部門ならニーズが大きいという面に着目すると、現在、民生部門が熱市場の1/4~1/3程度を占め、産業界がなかなかそのニーズに直結できない仕組みにあるが、その連携により新しい市場を生み出せる。

3. 地球温暖化問題と原子力

3.1. 原子力のCO₂削減効果と欧米の再重視機運

現在、世界で稼働中の原子炉の容量は約3.66億kW（2001年末）にのぼる。1年間に石油換算6.7億トンの一次エネルギーを生み出し、化石燃料を使用した場合に比べて発生するCO₂を約20億トン減らしている。

稼働率は概ね80%を超えるまで安定した電源となり、優れた経済性も実証されている。特に米国では、燃料交換間隔の延長や新手法の定期検査などによって、90%という高い稼働率が定着した。

欧米では21世紀入りの2001年以来、一時の原子力離れから転じて再び原子力を重視する機運にある。これは地球温暖化防止に加えて、米国などによるイラク攻撃に伴い議論が高まっているエネルギー自給率向上の問題が再浮上したことによる。

もちろん安定した実績が根底にある。懸案だった高レベル廃棄物の処分に関しても各国とも研究が進み、最終処分の方針が出そろった。今後は最終処分が実際に進むと思われる。

原子力技術の革新を狙う「第四世代原子炉」の開発も進んでいる。英米仏や日本、カナダなど10カ国が協力して開発するもので、2030年実用化を目指す。持続可能性、安全性、経済性、核不拡散性などの向上を目的としている。

3.2. 京都議定書の発効

こうした機運の中で、地球温暖化防止に向けたグローバルな動きである「国連気候変動枠組条約」は、昨年11月5日にロシア政府が京都議定書を批准したことによって本年2月16日から発効した。今後は、京都議定書以降の、すなわち2013年以降の次期枠組み国際交渉の活発化が予想される。そのなかでは「大気中の温室効果ガスをどの程度の濃度レベルで、またいつ頃安定化させるべきか」についての科学的知見が不可欠となってくる。

かかる視点から、最近日本のエネルギー関係研究機関から「西暦2450年までの地球温暖化防止効果を地球シミュレーターで検証」（電力中央研究所）、あるいは「CO₂排出制約条件と持続的エネルギー源の関係」（エネルギー総合工学研究所）といった画期的な研究が示されている。

これら研究から明らかになることは、地球環境維持のためには、省エネ推進に加え、太陽光・風力・バイオマスエネルギーなどの再生可能エネルギーと原子力エネルギーの大規模導入を図るしかないということである。また各国はそのタイムスケジュール設定によって、地球温暖化防止に向けたそれぞれの貢献度の大きさを測られることとなる。

3.3. 地球環境維持と原子力の重要性

そこで後者の研究結果のエッセンスを、「原子力の持続的エネルギー源としての重要性」（氏田博士・波多野守、季報エネルギー総合工学、2004年第2号）から紹介してみる。

現在370ppmの大気中CO₂濃度を2100年に550ppmで安定化させるシナリオのCO₂制約条件でのシミュレーション解析結果は次のとおりである。

①CO₂制約条件を満たすには、省エネ推進に加え、原子力エネルギーと新エネルギーの供給拡大が重要②原子力エネルギーのコストを安くできれば、2100年の発電全体コストの大幅上昇を抑制できる③高速増殖炉がないと平均発電コストが大幅に上昇④ウラン資源の制約がきつくなるに伴い平均発電コストが上昇⑤原子力水素により発電コストが低減⑥21世紀後半には発展途上国でも炭酸ガス排出制約が厳しくなる⑦長期的な意志決定から短期的な意志決定に変えると、原子力エネルギー利用拡大は遅延—21世紀の後半にCO₂排出量は同程度だがコスト高の電源比率が高くなる。

また日本におけるシミュレーション結果から得られる主な示唆は、以下の2点である。

①環境負荷の少ないエネルギーの利用、エネルギーコストの低減の観点から、原子力エネルギーをより安価なものにしていく努力が必要である。

②2100年までの将来を見越した持続可能な開発に対し実現可能性が高い将来の基幹エネルギーとして、高速増殖炉および核燃料サイクルシステムの経済性を向上し信頼性の高いものにしていくことが、地球環境と調和するエネルギー計画の課題となる。

3.4. 気候変動の激化予想と新エネルギー

前記のように石炭火力発電コストの上昇で、化

石燃料に代わって期待される新エネルギー利用の条件が整うことになる。しかし、最近急速に顕現化している台風・豪雨・洪水など気候変動が今後益々激化すると予測を踏まえると、風力・太陽光・バイオマスなど自然エネルギー源も今後大きな不安定要因を抱えることになる。

この点、2004年は世界気象の異変が顕在化した年であった。地域間の著しい気温差、各地の長期化する早魃、多くの地域における豪雨と洪水などである。

中国南部では、8月から10月にかけて乾燥し、過去45年間で最悪の早魃になった。また特に6月から9月にかけてのアジアの夏季モンスーン地域では多くの被害が発生し、北東インドとバングラデシュの洪水は過去10年間で最悪だった。

東アジアでも、中国の東部と南部では6月から7月にかけての豪雨により土砂崩れが発生し、1億人以上が影響を受け、1000名以上が死亡した。韓国では、3月5日の異常な低気圧により記録的な降雪があり、500億円以上の農業被害があった。日本では10月、2つの台風と前線活動によって記録的な豪雨があった。東京では、10月の降水量が780mmとなり、1876年以来の月間降水量で最大であった。

2004年の世界気象の異変は、上記の超長期にわたる地球温暖化効果のシミュレーションを踏まえると、今後一段と激化、恒常化するものと予想される。このため、新エネルギーを利用するためのプラントなどインフラの安定的稼働がより難しくなるとみられる。

こうした懸念は、今年の台風・豪雨・洪水などのような激しい気候変動の顕現化により今後益々強まることになろう。

4. 原子力の優位性と日本のエネルギー戦略

4.1. 日本の原子力発電の現状

日本の原子力発電は年間石油換算7000万トンの一次エネルギーを生み出している（2000年実績）。これは原油輸入量の3割に相当する。燃料の安定した供給やその備蓄性、さらにはリサイクル性のどれをとっても、日本のエネルギー安全保障の上で、これほど優位なエネルギー源はほかにはない。

今後も日本にとって原子力は不可欠なエネルギー源である。

イラク戦争などで日本の中東原油依存度の高さに対する危機意識も改めて高まり、エネルギー自給率向上の必要性も一層感じられる。原子力を強化することは、CO₂排出量削減という世界的な動きにも合致する。

日本が20%弱というエネルギー自給率を欧米並みに高めるには全エネルギーの1/4程度を原子力に依存せざるを得ない（現在13%）。それは後述のように原子力設備容量をさらに3000万kW程度増やし、稼働率を高めるなどすれば何とか達成できる水準である。

4.2. 原子力エネルギーの優位性

既述のように21世紀に入りエネルギー問題や環境問題が全人類と地球の未来にかかわる課題であることが深く理解されてきている。それに伴い、100年単位の長期的視点と世界的規模で、地球温暖化防止と持続的発展の調和のための方策が総合的に必要との共通の認識が広がっている。

この過程で、資源制約・地球温暖化防止・コスト面において大きな優位性をもつ原子力エネルギー、特に持続的エネルギー源として開発中の高速増殖炉（FBR）への認識が深まる可能性が出てきている。

持続可能なエネルギー源として、ウラン燃料のリサイクルは不可欠である。今の軽水炉ではウラン資源の1%程度しか利用できないが、燃料リサイクルとFBRによりその60倍程度の有効利用が図れる。FBRの開発と導入は不可欠なのである。

4.3. 「エネルギー自給率50%イニシアチブ」

長期的な視点が必要との問題意識から、2003年3月、経済同友会・富士通総研共同シンポジウムでわれわれは「エネルギー自給率50%イニシアチブ」を提示した。ここでは、2030年の一次エネルギー自給率50%を目標に掲げ、輸入化石燃料を50%まで引き下げ、代わりに原子力エネルギー25%、再生可能エネルギー25%が十分に達成可能とのプログラムを示した（表3）。

特にこのシンポジウムでは、田下正宣新型炉技術開発主監が2030年に原子力を一次エネルギーの25%にするプログラムを明らかにした。

表3 エネルギー自給率50%イニシアティブ

単位: Mtoe:石油換算百万トン

	2010年		自給率50%	
	政府目標	構成比%	(2030年頃の目標)	構成比%
化石燃料	432	78	250~280	50
石油	250	45	120	24
石炭	105	19	65~80	13
天然ガス	77	14	65~80	13
原子力	86	15	125~140	25
再生可能エネルギー	38	7	100~130	20~25
水力	20	4	20	4
地熱	1		8	2
太陽光	1.1		6~16	1~3
太陽熱	4.1		6	1
風力	1.2		3~6	0.5~1
廃棄物	8.6	2	20	4
バイオマス	0.3		40~50	8~10
その他				
総計	556	100	500~560	100

(出所) 経済同友会・富士通総研共同シンポジウム資料

2030年時点でも一次エネルギーは5億石油換算トンと想定し、現在の原子力設備容量(約4600万kW)を8000万kW程度まで増やし、稼働率を高めるなどすれば達成可能となる。具体的には、現在計画している新規原子炉建設に加え、寿命に達するものから大型炉へ建て替えれば達成できる。新設は平均年1基という緩やかなペースで可能である。国民に原子力の必要性和安全性を理解してもらい、コンセンサスを得ることが必要となる。

電力による供給で、現在稼働中(53基)、建設中および開発計画中(合計16基)に加えて、古くなったプラントの建て替え(19基)により、原子力で目標とする1.25億石油換算トンはクリア可能な姿が実際に提示された(表4)。

また2030年頃の、天然ガス改質による熱供給用小型原子炉(10万kW相当24基)による水素生産システムの実現化見通しも示された。

その後、本イニシアティブも大きな契機となり、2004年10月には、東京大学との学産連携による2030年の日本のランドビジョン「トリプル50(エネルギー自給率・エネルギー利用効率・化石燃料依存率50%)」が示されるなど、急速に長期的戦略策定の動きが拡がりつつある。

4.4. 「超長期エネルギー計画」

さらに2005年に入ると、超長期計画策定の動き

表4 原子力エネルギーで25%供給は可能か?

一電力による供給実現可能なケース

ケース	基数	総基数	発電設備容量 (万kW)	ノミナル ノミナル	発電量アップ 発電量 (億kWh)
A:現在稼働中	53	53	4,590.7	3,210 (70.6)	3,690 (80.6)
B:現在稼働中+ 建設中+開発計画中	53+ 16	69	6,613.5	4,630 (101)	4,860 (106)
C:現在稼働中+ 建設中+開発計画中+建替	53+ +16(+19)	69	約8,000	5,600 (122)	6,440 (141)

下段の()は石油換算 Mtoe
現在稼働中、建設中および開発計画中(合計16基)に加えて古くなったプラントの建て替え(19基)により目標とする、125Mtoeはクリア可能である。

(出所) 田下正宜 新型炉技術開発主監

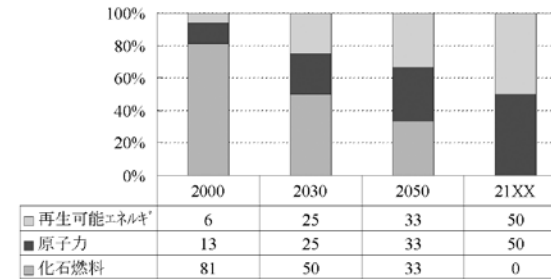
が出てきているが、原子力の最大利用を軸としている。

2005年1月11日付け読売新聞によると、政府は2050年、2100年の世界のエネルギー社会のあり方を示す「超長期エネルギー計画」の骨格をまとめた。CO₂濃度を抑えるため、2050年の先進国のCO₂排出量を2002年比で1/4の31億トン(CO₂換算)、2100年は1/20の6億トンまで低下させることを目標に掲げている。

目標実現に向けた日本のエネルギー戦略としては、①核燃料サイクルを含む原子力の最大利用②CO₂を地中に封じ込める炭素隔離技術の活用③水素、太陽光など再生可能エネルギーと省エネルギー技術の飛躍的発展—の3分野で新技術の研究・開発に積極的に取り組むべきとの考え方である。核燃料サイクルについては、現在の技術開発の延長線上にあり、環境問題や資源枯渇を克服する高い潜在力があると評価する。ただ、放射性廃棄物の問題などを念頭に、社会的に受容されるかどうか不確定な部分があるため、水素エネルギーなどの新技術開発も同時に進める必要があると付け加えている。

いずれにせよ、環境問題や資源制約を踏まえると原子力エネルギー利用に正面から取り組まなくてはならないが、長期エネルギー計画策定を契機にこうした気運が強まっているのは大いに評価できる。

この点、上記「2030年エネルギー自給率50%イ



(出所) 湯原哲夫 東京大学大学院教授

図1 超長期エネルギービジョン

ニシアチブ」策定メンバーである湯原哲夫東京大学大学院教授は、さらにこの延長上に、2100年頃を目途とする「再生可能エネルギー50%、原子力50%」という超長期エネルギービジョンを掲げている(図1)。

5. わが国原子力産業の現状と課題

5.1. 原子力発電の技術レベル

日本の原子炉は高速増殖炉「もんじゅ」の事故などの問題もあったが、概ね安全性は保たれている。肝心の原子炉周りの技術的安全性については完璧な実績を挙げてきた。国による安全審査、詳細設計など工事計画の認可、運転など保安規定の審査、建設時や定期検査における健全性チェックなどは確立されている。

技術水準が世界的にみて高く、技術者の陣容の厚みもある。さらに「多重防護」(異常や事故が起きても、拡大しないよう何重にもガード)や「多重障壁」(放射性物質が外界に出ないように何重にも囲う)により、安全性が確保されている。

このように現在世界に冠たるレベルにある日本の原子力発電プラントの製造・運転管理技術は、1979年のスリーマイル島事故以来長期間途絶えてきた米国の原子炉新設再開に際して、技術導入元である米国に対し逆に技術協力するという域に達している。

一方で、現在のわが国原子力産業を支える多くの原子力技術専門家を輩出してきた東京大学工学部から原子力学科名が一旦消滅したことに象徴されるように、これまで蓄積してきたわが国の極めて高い原子力技術レベルをいかに次世代にきちんと承継していくかということが重要な課題となっ

ている。この点、東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻などの形で今春から強化復活したのは評価される。

こうした優れた技術開発力を確実に維持・継続していく視点、あるいはウラン資源枯渇問題をもわたり原子力エネルギー確保が可能なプルトニウム利用も含め国産新型原子炉システムの開発を推進してきたのである。

すでに開発段階は成功裡に完了した今、この開発済みの国産新型原子炉システムの商業化が急務となっている。それが、高速増殖炉「もんじゅ」をはじめ、新型転換炉「ふげん」、小型船用炉「むつ」、および安価で大量の水素製造に適した多目的高温ガス炉の商業化であり、核燃料サイクルの商業化である。

これら国産新型原子炉システムの開発には、国家プロジェクトとして累積投資額3.7兆円が投じられてきた。まさにこれら開発に際して想定したエネルギー全般の高騰時代、あるいは地球環境深刻化時代を迎えた現在、国産新型原子炉システムの商業化に向けた具体的なプログラムの発動は待たないといえよう。

今年に入り、1995年のナトリウム漏洩事故以来稼働の止まっていた高速増殖炉「もんじゅ」の10年振り運転再開に向け、その前提となる改造工事入りの了解を福井知事が表明したのは朗報である。この機会を逃すことがあってはなるまい。

前述の「超長期エネルギー計画」においても、原型炉「もんじゅ」を1.5倍の100万kWにスケールアップした商業炉「スーパーもんじゅ」3基を2030年までに一気投入するといった意欲的な内容によって、ウラン燃料対策も踏まえたわが国のCO₂削減に向けた強い意志が示されてもいいのではないだろうか。

5.2. 原子力活用による地域の産業構造改革

ここで、現在わが国の最大課題の一つである持続可能な経済社会構築に向けた産業構造改革において、いかに原子力エネルギーが役立つかの一例を示してみたい。

これまでわが国の商業用原子力発電の推進においては、原子炉建設に向け地域関係者との安全性

や補償を巡る交渉が主なウエイトを占めてきたように見受けられる。

しかし冒頭で述べたように21世紀には、資源・環境保全・コスト面でみた各エネルギー源の制約条件が変化し、またインフレ財・サービスとデフレ財・サービスの併存というように世界経済のパラダイムも大きくシフト、さらには少子高齢化で逸早く過疎化が進む地域経済での持続可能な産業モデル探しが待ったなしとなっている。原子力発電や核燃料サイクル設備を巡る地元地域の環境も急速に変化している。

したがって、今後原子力エネルギーの最大利用を進める政策においても、こうした環境変化にマッチした発想が重要となる。この点、原子力発電プラントが立地地域の産業構造改革に大きく役立つかどうかは、地域全体の支持を得る上で大きなポイントとなる。

今後の地域産業は、折角の豊かな森林・水・土壌・海洋など自然資源を修復しつつ、例えば農林水産業を食料・飼料や木材（しかも安全な）だけ生産する産業ではなく、エネルギー産業の一環、あるいは医薬・化粧品向け素材産業として、付加価値や雇用を創出できることが重要となる。具体的には、「安全な“食”と生涯の“職”」を生み出せる工場型の有機無農薬農果樹園や陸の水産工場などに対するニーズが今後急速に高まるのは必至である。その際不可欠なのが光熱である。

ここに火力発電所と大差のない年間800億トン強もの大量の温排水を捨てるしかなかった原子力発電所の新たな地域経済における役割がみえてくる（表5）。「農漁業用コージェネ」といったコンセプトも生まれ、この光熱供給は地域産業に不可欠なものとなる。またこの温排水を活用して人工湧昇流を創ることで、発電所周辺は今後需給逼迫が予想される魚タンパク質資源の宝庫と化する。わが国沿岸に広がる磯焼け対策となる海藻の早期育成にも資する。

このように過疎化が進む全国各地域の産業構造改革に原子力発電所が大きな役割を果たせるということになれば、また原子力発電に対する国民の見方も変わってくることになるだろう。

表5 発電所からの温排水量

	発電設備機能力*1	発電電力量*2	稼働率	表層水温との温度差ΔT	温排水量*3	廃熱量*4
単 位	万kW	億kWh	%	℃	億t/年	Mtoe
火力	16,873	6,584	44	7	936	65.5
原子力	4,591	3,200	80	7	811	56.7
計	21,464	9,784			1,747	122.2

* 1. * 2 : 出典「EDMC, 2003」
 * 3 : 40 (火力) ~70 (原子力) t/s/100万kW
 * 4 : Mtoe = 10¹³kcal

(出所)湯原哲夫 東京大学大学院教授

5.3. 原子力発電関係者への期待

これまで縷々原子力エネルギーの優位性とその新たな活用策についてみてきた。今後長期的なわが国の一次エネルギー供給は、脱化石燃料で、原子力エネルギーと再生可能エネルギーで確保する方向の必然性も改めて痛感された。こうした思いで、わが国の原子力エネルギーにかかる論議などに着目してみると、原子力関係者の情熱的な顔が見えず、あるいは熱い想いがさして伝わってこないと感じるのは筆者だけであろうか。

確かに、これまで高速増殖炉「もんじゅ」のナトリウム漏洩事故（1995年）、ジェーシーオー（JCO）臨海被爆事故（1999年）、もんじゅ名古屋高裁敗訴（2003年）、東電不正報告事件（2002年）、巨額のバックエンドコスト試算（2004年）、関電美浜爆発事故（2004年）など原子力の暗いニュースが続いている。さらには核燃料サイクル開発政策の見直し論議まで飛び出し、関係者が自信喪失気味になるのも理解できなくもない。

しかし、第一次石油危機以降本格的な導入が推進されてきたわが国の原子炉周りの技術的安全性に疑念を抱かせる事故は皆無である。国民の安全性を危機に曝す事態はいまだ発生していないという事実は重要である。

問題なのは、2次系冷却水パイプチェックの20年間にもわたる手抜きといった企業のリスク管理体制そのものなのではないか。

近年増加している製鉄所や石油精製所などの爆発事故と類似のこうした事故は、わが国の優れたモノづくりを支えるインフラの弱体化問題と軌を一にするものとも理解される。こうしてみると、

他産業類似の事故が発生している一方で、完璧な原子炉周りの技術的安全性実績を併せ持つ原子力発電業界を中心に、関係者が今後いかに“安心”に対する国民の信頼を獲得していくかが最大の課題となる。この点、何と言っても他の政策と同様に、マスコミを含めて徹底的に国民への説明責任（アカウンタビリティ）を果たすという基本的な姿勢が求められる。

その際、原子力エネルギー問題をタブー視することなく、また原子力専門家の内輪中心のディフェンシ的な技術論的議論にとどまらないことが重要である。加えて国民全体に対して積極的に、21世紀の地球環境問題やエネルギー・食糧問題解決に際して、いかに原子力エネルギー活用が有効かという説得力ある事例などの説明も不可欠である。原子力専門家関係者の、いわばシステムイノベーション的な発想への転換が求められているわけである。

一点、関係する専門家は是非望みたいのは、東電不正報告（シュラウドヒビ割れ）につながった、クラックを全く許さないといったわが国の「無欠陥の原則」ルールなどを、世界の評価基準と整合的なものへと絶えず見直すという姿勢である。

安全性に関する国際的評価基準の統一性に関する問題は他の業界でも数多く発生している。現実に沿った基準、ルールでないとは本質的なリスク管

理につながらないという認識は共通になっている。幸い、その後シュラウドのクラックについても「維持基準」あるいは「リスクベース基準」といった実態に即したものと見直されつつある。

もとより原子力関連の企業レベルでのリスク管理に万全を期するのは当然である。加えて、専門家によるこうした基準や評価ルールの絶えざる検討を含め原子力の安全性モニター方法、あるいは国民の安心獲得に向けた知識などの水準引き上げ、教育、共有が図られるよう、全国的な活動が必要な時期を迎えているだろう。関係者の奮起を期待したい。

参考文献

- 1) Japan Association of Corporate Executives and Fujitsu Research Institute Joint Conference. 2003. “The 50% Energy Self-Sufficiency Initiative.”
- 2) Tanabe, T.; Yamagishi, Y.; Yuhara, T. 2003. “The New Energy Century.” Nihon Keizai Shinbun Seminar.
- 3) Ujita, H.; Hatano, M. 2004. Genshiryoku no jizokuteki enerugii gen toshitenō jūyōsei (The Importance of Nuclear Power as a Sustainable Source of Energy). Institute of Applied Energy, Seasonal Report.

中山道一人旅 (その5) ~近江路を歩く~

Sentiment of Solitary Journey on Nakasendo - Hike Through Oumiji -

米田正章*
Masaaki Yoneda

【概要】

中山道一人旅は、日本橋を2003年夏にスタートし、武州・上州路、信濃路、木曾路、美濃路と進み、最後の近江路に入った。近江路は、日本一の琵琶湖の東岸を東から西に抜ける街道である。本号は、関ヶ原宿から草津宿を経て京都三条大橋までいたる道中記である。

2004年11月20日 (土)

関ヶ原宿—今須宿—柏原宿—

醒井 (さめがい) 宿—番場宿—鳥居本宿

9時10分 JR関ヶ原駅前から中山道である国道21号線に出る。激しく車が行き交う。脇本陣跡



関ヶ原宿脇本陣跡



関ヶ原宿西首塚

左折して静かな道へ進むと、道が狭くなる。家の裏に畑があり、その真ん中に天武天皇の「兜掛石」がある。このあたりに不破関の関戸があったらしい。街道のすぐ先に「不破関跡」の案内板が立っている。壬申の乱 (672年) の後、この東山道美濃不破関と東海道の伊勢鈴鹿関、北陸道の越前愛



壬申の乱の戦場 藤古川

発 (あらち) 関が設けられたと記されている。大木戸坂を下ると藤古川が流れている。壬申の乱の戦場で、この川を挟んで東に天武天皇軍、西に大友皇子軍が対峙した。藤下集落から国道を越えて山中集落に進む。細い流れの黒血川を跨ぐと右下に水量豊かな「鶯の滝」が音をたてて落ちている。北谷川の右を進む。新幹線の下をくぐる。小公園の隅に五輪塔が大小10基ほどある。東国に下る途中土賊に殺された常盤御前と乳母の墓と伝えられている。広い道が緩やかに上がって山の中に入っていく。今須峠を越えた、右手上の杉林の下に石塔が二つ覗いている。国道に合流したところから今須宿が開け、左に復元された一里塚がある。門前橋、今須橋を渡る。民家の中を真っ直ぐに道が伸びる。関ヶ原町立今須小・中学校が「本陣跡」。しかし学校に本陣であったことを示すものはなにもない。往時の姿で山



今須宿山崎家問屋場跡

* (株) 荏原製作所 新エネルギー事業本部 原子力事業統括 プロジェクト管理部

崎家の「問屋場」がある。常夜燈がある。格子に弁柄の朱が残る。ひっそりとした道は曲がりながら緩やかに上っていく。大きな常夜燈が立っている。国道を越え、東海道本線車返踏切を越える、オーツカ関ヶ原工場の前を左折する。「寝物語の里」である。美濃国と近江国の境が数十センチの溝である。美濃側に「両国屋」、近江側に「かめや」という旅籠があり、寝ながら隣の国の人と話してきたことから、寝物語の里と言われた。



美濃・近江国境の溝

美濃路から近江路に入って、道は滋賀県坂田郡山東町長久寺の静かな集落を緩やかに上っていく。やがて家が途絶えて右の山すそに太い楓が続く並木が現れる。東海道本線野瀬踏切を渡り、右折して線路沿いを進む。小川のたもとに「照手姫地藏堂」がある。柏原宿に入る。家々は柱に弁柄が塗られ赤っぽい。各家に江戸期の住人を示す大きな看板が掛かっている。本陣跡は立札のみ、



照手姫地藏堂



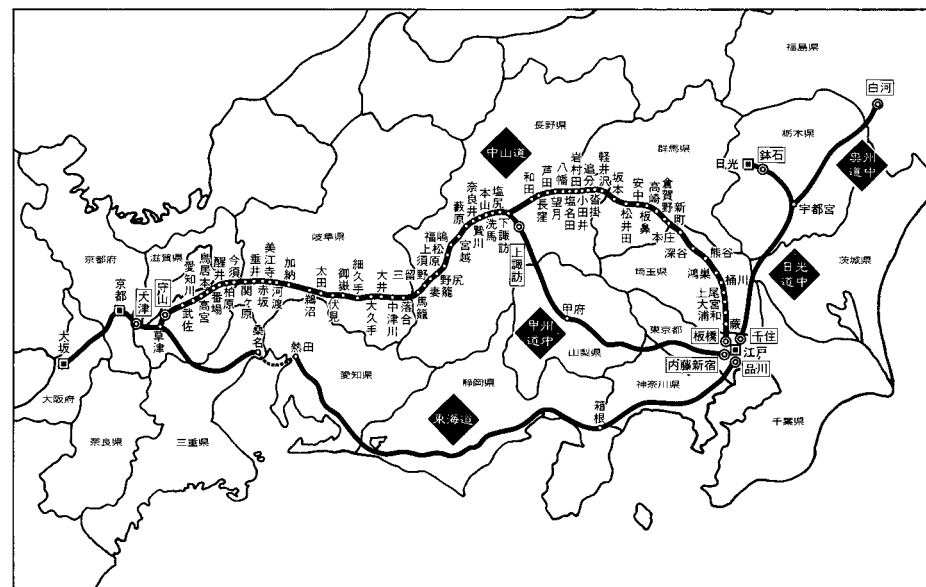
伊吹堂亀屋左京

高札場跡、伊吹もぐさの販売で有名な伊吹堂亀屋左京と続く。その先には商家を改造した「柏原宿歴史館」があり、宿場の資料が展示されている。右手に一里塚跡、その先には松並木が続く。梓 (あんさ) に入り小川の関跡から杉林を通り抜け、梓河内の集落の中をくねくねと曲がる道を進む。梓川の土手に松並木が続く。国道に合流する。国道21号に「左 中山道」の大きな石碑が立っている。ほどなく国道から左手に入り、谷間の一色集落を抜け醒井宿に入る。左に「加茂神社」がある。神社の隣には延命地藏堂があり、現在は料理旅館となっている本陣跡と続く。道の左側には清らかな地蔵川が流れている。ぶらりぶらりと歩いている観光客が多い。やがて民家の前に「六軒茶屋跡」



醒井延命地藏堂

の表示がある。昭和30年頃には6軒がまだあったそう。国道に合流し丹生川を渡る。米原町河南



(藤市立歴史民族資料館「街道と宿場」より)



醒井宿本陣跡



久礼の一里塚跡の石碑

で右に分かれる。静寂な家並みが続く。国道を横切って樋口の集落を進む。北陸自動車道をくぐると「久礼の一里塚」の大きな石碑があり、その右を進む。やがて番場宿に入る。ふつうの民家が続き、宿場の面影はない。番場の名を有名にしたのは番場の忠太郎である。長谷川伸作「験の母」の主人公だが、フィクションに過ぎない。北村家の玄関前に「明治天皇番場小休所」の碑が立っている。「中山道 番場宿」の大きな石碑がある。その先



番場宿の碑

を左折し名神高速道路をくぐると山すそに「蓮華寺」がある。街道は緩やかに上る道が続き、東番場から西番場へ移る。家々の柱には弁柄が塗られている。湖国バスの西番場停留所で家並みが途切れる。右は田、畑そして小高い山に続く。すぐ左を名神高速道路が走り、高速道路沿いの道を上がっていき、小磨針峠を越え一気に下る。「摺針峠 彦根」と刻んだ新しい道しるべを見て、右折して摺針集落を抜け上り坂なり摺針峠に着く。舗装路を下り、国道21号に出る。左手に「おいでやす彦根市」の石塔が三基立っている。鳥居本宿に入る。右手角の旧家は、和漢健胃薬赤玉神教丸本舗有川家で、今も薬局を営んでいる。街道沿いにはまだ旧家が少し残っている。琵琶湖周辺で生育する楮(こうぞ)を原料とした紙



おいでやす彦根市のモニュメント

に洪柿を塗布することで、防寒具としての機能を高めた道中合羽の「本家合羽所木綿屋嘉右衛門」跡の旧家も残る。その前の民家の庭の金網に「本陣跡」の表示があり、1軒おいて隣の板塀に「脇本陣跡」とある。15時50分、近江鉄道鳥居本駅着。



鳥居本宿街並

2004年11月21日(日)
鳥居本宿-高宮宿-愛知川(えちがわ)宿-武佐宿



手書きの鳥居本宿案内板

8時半、鳥居本駅から歩き始める。街道にある鳥居本宿の案内板は手書きで作られている。石の道標に「右彦根道 左中山道 京 いせ 文政十丁亥秋建立」とある。右に伸びている彦根道は、朝鮮使節が通ったいわゆる「朝鮮人街道」である。この道は、彦根、能登川、安土、近江八幡を経て野洲で再び中山道と合流する。宿場を出ると田園風景となり、道はくねくねと曲がり名神高速道路と東海道新幹線が接近し、その間のわずかに残された狭い場所を進んで行く。新幹線の高架橋を潜り、原の集落を進む。右に八幡神社がある。その先には「天寧寺五百羅漢」と書かれた石碑がある。その先には、多賀退社への道標がある。国道306号の正法寺町交差点を渡り、芹川に架かる大堀橋を渡る。石清水八幡宮の前の道端にも「是より多賀みち」の道標がある。県道が広くなり高宮町に入る。高宮宿の表示と背の高い常夜燈を見て近江鉄道の踏切を渡る。眼病でご利益のある木之本地蔵の分身といわれる彩色された木彫りの「大北の地蔵」がある。高宮宿は犬上川の渡河を控えていること



大北地蔵



高宮宿提灯屋

に加え多賀大社参詣者が多く、武州・本庄宿に次ぐ中山道第2の大宿として賑い、宿場の面影が色濃く残っている。高宮上布の間屋だった「布惣跡」、提灯製造の馬場。左手に「多賀大社」の大きな一の鳥居があり、大社への「多賀道」が伸びている。小林家には「本陣跡表門」がある。塩谷家は「脇本陣跡」。道は緩やかに上がり、犬上川に架かる「無賃橋」と呼ばれた高宮橋を渡る。約170年前の天保年間に人々の義捐金により架けられた。道が広くなり、徐々に農家が増える。葛籠町には、鳥居本宿に入るところにあった「おい



またおいでやす彦根市のモニュメント



豊郷小学校

でやす彦根市」と同じモニュメントが「またおいでやす」と立っている。石柱の上のブロンズ像は、麻の原料を運ぶ女性、宿場へ向かう旅人、荷を運ぶ人足の3体。葛籠町を過ぎ、間の宿「石畑」に入る。「先人の贈り物 豊郷小学校を登録文化財に」「取りもどそう 豊郷小の原風景」の看板があり、歩き進むと、左手にその「豊郷小学校」がある。大学の本館と言われてもおかしくない佇まいである。昭和12年丸紅専務であった古川鉄治郎の寄付により建てられた県下初の鉄筋の小学校で、当時東洋一の校舎といわれ、全国から参観者が訪れたそうだ。八幡神社には、一里塚の碑がある。八目集落に入ると、伊藤忠商事・丸紅の創業者である伊藤忠兵衛の屋敷跡があり、功績を偲んで建てられた「くれない園」がある。その先には、豪商藤野喜兵衛の旧宅である「又十屋敷」があり、玄関脇に中山道一里塚址の小さな石柱が立っている。その先の右手一



江州音頭発祥地の碑



愛知川宿のアーチ

画には「江州音頭発祥地」の碑がある。宇曾川に架かる「歌詰橋」を渡る。真っ直ぐな道を進み、愛知川町香掛の交差点を過ぎて右へ入る。中山道愛知川宿のアーチが迎えてくれる。左手に土蔵造りの近江商人亭という料理屋があり、和菓子屋が並ぶ。滋賀銀行愛知川支店のある交差点にポケットパークと名づけた小公園があり、明治期の郵便ポストである書状集箱が立っている。日本生命の横が「本陣跡」であり、その先の倉庫になっている洋館が「脇本陣跡」である。八幡神社の鳥居脇に「高札場跡」。商店、民家が入り混じり、格子のある家が入り混じる。不飲川を越える。川の名は平将門の首を川の水源地の池で洗ったので水が血で濁り飲めなくなったことに由来する。国道8号に合流する。御幸橋のたもとに



常夜燈

は、大きな常夜燈が立っている。橋を渡る。五個荘町に入る。梁瀬北交差点を左折して近江鉄道の線路を越え、細い道を下る。「左いせ ひの八日市みち 右京みち」の道標がある。藁葺の家を見ながら道は右に大きく曲がり、小幡川を渡り右からの道に合流して左折する。五個荘町役場。藁葺の家。洋館。幕末から三代続く西沢梵鐘製造所の前には大きな釣鐘が置いてある。奇麗に整備された道が続き、国道8号に合流しすぐ右に入る。合流点にはてんびんの里近江商人の銅像が立っている。静かな通りを進むと、旅人の喉を潤した「清水鼻の名水」がチロチロと流れ出ている。奥石神社への矢印に沿って左折する。すぐに老蘇(おいそ)の森に抱かれた「奥石神社」がある。道はくねくねと曲がる。



武佐宿脇本陣跡



旅籠中村屋

右手に安土老蘇郵便局, 左手には老蘇小学校, しばらく行くと鎌若宮神社, 東光寺と続き近江八幡市西生来町に入る。右手に牟佐神社, その前に高札場跡があり武佐宿が始まる。脇本陣跡は武佐町会館となっている。町の中心部には旅籠中村屋があり, 現在も料理旅館を営んでいる。松平周防守陣屋跡もある。道を進むと, 常夜燈があり西の高札場跡で武佐宿は終わる。15時15分 近江鉄道武佐駅着。

平成16年11月22日 (月)
武佐宿一守山宿一草津宿



近江鉄道武佐駅

8時15分 武佐駅から歩き始める。踏切を越え, 若宮神社を過ぎ, 西宿交差点で国道8号に合流する。六枚橋交差点を左折し, 右の静かな道を進む。家の間に水田が見え, 右に連なる山並みの一番先には比叡山が見える。また国道と合流し, 馬淵町信号で右に国道と分かれ, 東横関集落に入る。柿が鈴なりになっている。道は日野川の土手に突き当たる。土手を左に歩き, 国道に架かる横関橋を渡り, すぐまた土手を歩く。西横関の集落を通る細い道を進む。光善寺川を渡り, 間の宿である「鏡宿」に入ると, 旅籠「亀屋跡」があり, 鏡草の根ハウスの前には約20体の石仏が並んでいる。鏡口交差点で国道に



間の宿鏡宿の石仏

合流する。道はゆっくり上がっていく。民家の間の空き地に「源義経宿泊の館跡」, その先には「本陣跡」, 「加賀屋跡」など国道沿いに表示だけが立っているだけで, 過去の歴史を感じさせるものがない。宿外れには, 「義経元服の池」がある。



源義経元服の池

COSMO石油の先, 左手に平宗盛の字がかすむ小さな標識があり, 細道を数十メートル入った林の奥に「平家終焉の地」がある。この地で義経に斬られ, 平家が滅亡した。右に水田, 左に池を見ながら国道を歩き, 石材店で斜め右に入り緩やかに上る。高台に大きな愛宕山常夜燈がある。天井川である家棟川の下をつらぬく「家棟隧道」をくぐる。ゆったりした農家が続く。子安地蔵堂, 桜生史跡公園, 甲山古墳を過ぎ, 東海道新幹線に近づく。関ヶ原のあたりから中山道と東海道新幹線は, もつれるようになって京に向



家棟隧道

かっている。蕁茸の造り酒屋を過ぎ, 新幹線のガード下から, 斜めに入って住宅街を進む。野洲小学校の前には野洲宿碑が立っている。行畑商店街に入る。その先の交差点からは, 「近江富士」と呼ばれる三上山のコニーテ型の山容が美しい。野洲本町商店街は, 商店が少なく, 人影も少ないが, 車の行き来は多い。東海道本線のガードをくぐると, 右手に十輪院のお堂, 左手には石地蔵が並んでいる。野洲川橋を渡る。斜め左後ろに三上山が見える。守山市に入り, パチンコ屋の横に「馬路石邊神社 (田中大明神)」があり, 馬路郷田中庄の総鎮守だったことに名前の由来があるそう。真っ直ぐに行



野洲川橋



造り酒屋宇野本家

く。吉見3丁目交差点で県道11号と交わる。街路灯に中仙道守山宿の看板が掛かる。くねくね曲がる道に, 益須 (やす) 寺跡, 高札場跡, 古い屋敷が残っている。西藤内科の前には, 重厚な古い商家の「宇野本家」がある。元総理大臣故宇野宗佑氏の実家だそう。本陣跡は見つからない。左手には, 謡曲「望月」の舞台となった甲屋跡, 古い看板の下がった蠟燭屋の「やまなか」と続く。三叉路に道しるべがある, 「右 中山道 美濃路 左 錦織寺四十五町 こ乃は満みち」。真っ直ぐ進んで, 吉川に架かる「土橋」を渡ると, 右手には樹下神社の境内に「常夜燈」と「安産石」がある。今宿商店街に入る。やがて左手, 今宿農協バス停前に「今宿一里塚」の南塚の上に2代目の榎が枝を広げている。次の十字路, 焔魔堂町交差点を過ぎると, 住蓮房母公墓の墓があり, 諏訪神社には「従是南淀領」と刻まれた石柱がある。信号を越えると二町町, そして栗東市に入る。総 (へそ) 9丁目左の木立の中に大宝神社があり, 境内の鳥居脇に芭蕉の句碑「へそむらの まだ麦青し 春のくれ」がある。葉山川の手前から草津市になる。左にJRの線路。中山道は線路と住宅の中に消える。線路下の低い天井の通路を, 腰を屈めてくぐって反対側に出る。鎌田電気につかり右折。渋川通りの左手に「伊砂砂 (いささ) 神社」がある。細い道なのに車は多い。民家が商店に変わる。草津倉庫, UFJ銀行, エース電器, サンフラワー美容室等々, そしてアーケードのある商店街になって, 北中アベニュー, 夢大路商店街に続く。



今宿一里塚

草津川の下トンネルに入る。草津川隧道を出たところが東海道との合流点「草津追分」である。トンネルの出口右手には, 延命地蔵があり高札場が復元されている。出口左手には, 文化13年 (1816年) に建立された常夜燈があり「右 東海道いせみち 左 中仙道美のち」と刻まれている。交通の要衝である。織田信長は將軍足利義昭から「何が欲しいか」と尋ねられ, 「堺と草津」と答えたという。江戸・日本橋から129里10町 (約510キロ) と長かった中山道はここで東海道に合流した。その先右手に「草津宿本陣」がある。江戸時代そのままの規模で残されているとのことだが, 本日は月曜日で休館日。先に進むと, 左手に脇本陣仙台屋跡, 現在は観光土産店がある。右手には問屋場, 貫目改所跡が残っている。14時30分, 中山道と東海道の合流点に戻り, 本日の旅を終了する。草津は, 筆者が小学校の高学年から高校を卒業するまで住んでいた町である。昔の記憶を辿りながら, もう一度町を歩き, 夜は昔の仲間と一杯。



草津宿街並

平成16年11月23日 (火)
草津宿一大津宿一京都三条大橋



草津宿の常夜燈・道標

中山道をたどって京へ行く旅人にとっては, 草津から京都三条大橋までは東海道ではない, あくまでも中山道である。と, 言う訳で, 7時半, ホテルを出て本陣商店街を進む。草津宿本陣を過ぎ, 新草津川に架かる矢倉橋を渡る。住宅街を右に左に曲がる。国道1号を矢倉南信号で渡り, 国道下を右折。「野路一里塚跡」のある上北池公園を横切り, 静かな住宅街を進む。清らかな清水が湧いた「野路の玉川跡」には味気ない表示板が立っている。弁天池, 川を渡って大津市月輪町に入る。



草津宿本陣

草津宿本陣



野路の玉川跡



一里山町の一里塚の跡



瀬田の唐橋



膳所神社

一里山の交差点の脇に地元の有志によって立てられた一里塚跡碑がある。住宅の間の道は上り下りを繰り返す。大江3丁目で左折し右折し、緩やかに上り緩やかに下る。神領に出て左折する。突き当たって右折すると「瀬田の唐橋」に出る。もっと南にあったのを織田信長が現在の場所に变えたのだともいう。石山商店街を北上し京阪電車の踏切を越えJR東海道本線の下を潜る。近江八景「粟津の青嵐」は、望むべくもない。御殿浜、膳所城勢多口総門跡を過ぎると、江戸期を偲ばせる家が増えてくる。若宮八幡から、膳所商店街を進む。膳所神社を左に見て直進し、和田神社の先を左折する。この辺りは筆者の高校生活思い出の地である。平野商店街を抜け、街道が細く真っ直ぐに伸びる。大津宿に入る。道幅の狭い街道の街灯に江戸期の地名が表示されている。左手の路傍に「此付近露国皇太子遭難之地」の標識がある。中京町から上京町を過ぎて「札の辻」に出る。左に曲がると「明治天皇聖蹟」の碑があり、大津宿本陣跡である。車の排気ガスを全身に浴びながら逢坂山関への上り坂に向かう。



大津宿本陣跡



逢坂山関址石碑と常夜燈

頭上に「東海道自然歩道逢坂歩道橋」が見え、「逢坂山関址」の碑に着く。国道を進み月心寺を左に見て歩く。山科盆地に入り、国道から別れて静かな道が続き、緩やかな坂の先で京都市山科区に入る。商店街を進むとやがて常夜燈や地藏堂が迎えてくれる。当麻寺を過ぎ、左手に「右ハ三条通」の道標を見る。ゴールが近づいてきた。東海道本線のガードをくぐると、右側に天智天皇御陵の森が見える。その前の床屋の角から細い道を上る。亀水不動尊を過ぎ、軽自動車一台がやっと通れるような山際の道、日ノ岡の旧道を進む。車両が行き交う三条通りが遙か右下を通っている。やがて三条通りに合流する。平安神宮の鳥居を右に見ると、三条大橋は近い。折りしも



京都の街並



京都三条大橋

紅葉の季節で、町は観光客で溢れ返っている。15時25分、三条大橋に到着。534軒の中山道の旅は終わった。日本橋から三条大橋までの一筋の街道を延べ25日歩いた。見て、聞いて、食べて、そして多くの人たちにお世話になった。感謝そして感激。

FAPIG の 機 構 (社名 ABC順)

(平成17年3月1日現在)

理 事 会・委 員 会・専 門 部 会・事 務 局

会 長 沢 邦彦 富士電機ホールディングス社長	理 事 佐藤康博 みずほCB常務執行役員
副会長 林 敏和 川崎重工執行役員	〃 北村敏夫 渋沢倉庫取締役会長
〃 田邊弘幸 双日専務執行役員	〃 荻原勉 清水建設執行役員
理 事 長 藤 史郎 荏原製作所取締役専務執行役員	監 事 金井琢磨 みずほCB営業第十部長
〃 伊藤晴夫 富士電機システムズ社長	
〃 長屋互勇 富士通経営執行役常務	事務局 溝口忠雄
〃 田邊輝義 古河電工執行役員常務	
〃 植松敏勝 古河機械金属常務取締役	

FAPIG委員会および専門部会

(◎は委員長または部会長, ○は副委員長または副部会長)

企画委員会 (14名)

- ◎ 秋定俊裕 (富士電機システムズ)
- 三沢秀行 (荏原製作)
- 早川均 (富士電機システムズ)
- 三木俊也 ()
- 秋山敬悟 (富士通)
- 岩崎邦男 (古河電工)
- 中川敏一 (古河機械金属)
- 矢野和隆 (川崎重工)
- 金子治行 (みずほCB)
- 清水良雄 (双日)
- 駒崎慶夫 (渋沢倉庫)
- 小林経夫 (清水建設)
- 溝口忠雄 (事務局)

オブザーバー

- 阿部修一 (原燃工)

広報委員会 (11名)

- ◎ 溝口忠雄 (事務局)
- 米田正章 (荏原製作)
- 三木俊也 (富士電機システムズ)
- 桜本和博 (富士通)
- 岩崎邦男 (古河電工)
- 岩間和義 (古河機械金属)
- 湯原貴浩 (川崎重工)
- 秋澤弘行 (みずほCB)
- 村野博一 (双日)
- 菅野康弘 (渋沢倉庫)
- 酒井喜則 (清水建設)

原子力情勢調査部会 (6名)

- ◎ 清水良雄 (双日)
- 白川正広 (富士電機システムズ)
- 組田泰男 (荏原製作)
- 福原修 (富士通)
- 湯原貴浩 (川崎重工)
- 加納茂和 (清水建設)

高温ガス炉プロジェクト部会（6名）

- ◎ 早川 均 (富士電機システムズ)
- 中村志郎 (双 日)
- 岡本太志 (富士電機システムズ)
- 前川 勇 (川崎重工)
- 甲斐芳郎 (清水建設)
- オブザーバー
- 加藤 茂 (原 燃 工)

廃止措置プロジェクト部会（8名）

- ◎ 山口 昇 (川崎重工)
- 高谷純一 (富士電機システムズ)
- 荒井正幸 (荏原製作)
- 樋口哲二 (富 士 通)
- 沢本雅弘 (双 日)
- 渡辺守成 (清水建設)
- 竹田正幸 (荏原工業洗淨)
- 池田 兵 (第一放研)

バックエンド調査研究部会（6名）

- ◎ 山崎誠一郎 (川崎重工)
- 藤沢盛夫 (富士電機システムズ)
- 根岸 至 (荏原製作)
- 三澤 真 (富 士 通)
- 井上桂一 (双 日)
- 加納茂和 (清水建設)

品質保証部会（7名）

- ◎ 高橋正昭 (富士電機システムズ)
- 河江秀俊 (川崎重工)
- 米田正章 (荏原製作)
- 児玉義和 (富 士 通)
- 有本 徹 (古河電工)
- 石黒修司 (双 日)
- 中村 誠 (清水建設)

事務局

局長 溝口忠雄

FAPIG No.169
平成17年3月25日印刷

平成16年度 第3号
平成17年3月31日発行（非売品）

発行所 第一原子力産業グループ事務局
〒107-8655 東京都港区赤坂6丁目1-20
双日(株)内
電 話 (03) 5520-4911

ホームページ: <http://www.fapig.com/>

編集兼発行人 溝口忠雄
印刷所 ミズノブリテック(株)
〒104-0042 東京都中央区入船2-9-2
電 話 (03) 5566-6677(代)

SYNOPSIS

Masao Tamada, Noriaki Seko, Noboru Kasai, Takao Shimizu

Synthesis and Practical Scale System of Braid Adsorbent for Uranium Recovery from Seawater

FAPIG No. 169 pp.3~12 (2005)

Braid adsorbent having functional group of amidoxime is a promising material for the recovery of uranium dissolved in the seawater. This braid adsorbent was made by polyethylene multi-fibers in which amidoxime groups were introduced by radiation-induced graft polymerization and subsequent chemical treatment. Reaction time for graft polymerization was 5h and the resulted braid adsorbent had 2.8mmol/g-adsorbent of amidoxime group. The braid adsorbent obtained was moored at the offing of Okinawa Island. The adsorption of uranium reached 1.5g/kg-adsorbent for 30d soaking. The mooring system for braid adsorbent has possibility which reduces the cost for the recovery of uranium from seawater. It is shown that 134km² of mooring area is needed for annual product of 1200 tons of uranium. In addition, there is 6000km² and more of suitable sea area for the collection of the uranium in the regions from Okinawa Islands to Tosa Bay in Japan.

KEYWORDS : recovery of uranium, seawater, braid adsorbent, amidoxime, graft polymerization, marine experiment, uranium adsorption, mooring system, sea area

Nobumasa Tsuji, Taiju Shibata, Junya Sumita, Masahiro Ishihara, Tatsuo Iyoku

Study on Structural Integrity of C/C Composite Using as Core Restraint Mechanism in HTGR

FAPIG No. 169 pp.13~17 (2005)

High temperature gas cooled nuclear reactor (HTGR) with higher outlet coolant temperature nearly 1000°C is expected for utilization of hydrogen production. The thermal analysis with 3 dimensional, flow paths coupled model was conducted to demonstrate how strictly PSR block gaps must be closed to limit core bypass flow rate ratio lest fuel temperature should be remained in admissible level, and the highly heat resistant core restraint mechanism must be developed in consequence. Potential applicability of the core restraint mechanism made of C/C composite, the attractive candidate material, was demonstrated by point design with adequate thickness and FEM stress analysis for material with orthotropic anisotropy.

KEYWORDS : HTGR, core restraint mechanism, C/C composite, core bypass flow

Daisuke Sadahiro, Hiroshi Shibamoto, Hideaki Nagashima, Naoto Kasahara, Kazuhiko Inoue

The Study on Evaluation Method for Primary Stress of 3-D Structure

FAPIG No. 169 pp.18~22 (2005)

This paper describes an evaluation method of primary stress in 3-D structures. In “Design by Analysis” for nuclear components, the stresses in structures are classified into the primary and the secondary stresses. The primary stress in axisymmetric structures can be evaluated by linealization of stress distribution in the specified section, but it is difficult to define the evaluation section in the 3-D structures, and to evaluate the primary stress with the conventional procedure. From this reason, the alternative evaluation method is needed.

In this paper, the evaluation method of primary stress in 3-D structures is presented utilizing the feature of primary stress that is independent from stress re-distribution.

KEYWORDS : nuclear components, primary stress, stress classification, stress redistribution

Hitoshi Kumagai

Development on Structural Health Monitoring System

FAPIG No. 169 pp.23～26 (2005)

The authors have developed “structural health monitoring system” comprised of sensing, data processing, and diagnosis subsystems, for building and civil infrastructure. In this paper, application of this SHM system to the actual buildings with vibration suppression system and base isolation system are introduced. Internet-based data processing and analysis system is also successfully utilized in these buildings.

KEYWORDS : structural health monitoring, fiber optic sensing, internet based system

Hitoshi Abekawa, Yoshikazu Suzuki

Facility Management System Promotion

FAPIG No. 169 pp.27～31 (2005)

In Fujitsu, we have been developing, and providing the facilities management systems for a quarter of century.

The system described in this article as an efficient facility management system is called Futuric/B. Fujitsu provides Futuric/B in cooperation with the Shibusawa Warehouse Ltd. installation system.

The movement to make this facilities management system open is also getting stronger day by day.

Since October 2003, the needs for a system to be compatible with the BACnet protocol (approved by the ISO standard) have increased, and the equipment side and the intelligence have advanced resulting in an increase in a number of products that are compatible with the LonWorks.

Today, Fujitsu is proud to present the facilities management system (Futuric/SX) that is compatible with the BACnet and the LonWorks. Futuric/SX has been developed, commercialized, and added to the line of our products.

The article gives an outline of the newly developed functions in the facilities management system and it talks about the features of each of equipment.

KEYWORDS : the facilities management systems, for a quarter of century, the BACnet protocol, the LonWorks

Toshinori Tanabe

The Advantages of Nuclear Power in the Wake of the Soaring Prices of Coal

FAPIG No. 169 pp.32～41 (2005)

The cost of coal fueled energy production is twice the cost of long-term nuclear power generation. The direct reason for this is the soaring price of coal, which has reached a height not attained in a quarter of a century. Like crude oil in countries such as China, it is expected to be short in supply and short in demand for some time coming. While many look to the development of new energy mechanisms such as solar energy panels and wind turbines, the increase in extreme weather brought about by changes in the global climate sheds doubt on the effectiveness of these methods. In the 21st century, as we witness great changes in our global environment and energy utilization, the advantages of nuclear power generation in terms of costs, global warming measures, and resource conservation are being increasingly recognized. Now is the time to capitalize on these advantages. Responsible explanations about the safety of nuclear power are needed in order to restore the people's trust in this resource. Meanwhile, we should push forward with those projects that have clearly demonstrated their safe utilization of nuclear reactor technologies.

KEYWORDS : Japan nuclear power, global warming, industrial reform policy



春の池畔(東京 不忍池)

作者プロフィール

佐々木 貴 Sasaki Takashi

1939年 福島市生

1998年 川崎重工工業原子力本部退職
元FAPIG 編集委員会委員

写真歴

1979年 コニカFS-1 一眼レフカメラでスタート

1984年 神戸で全日本写真連盟主催の基礎写真講座受講
プロ写真家森井 禎紹先生の写真クラブに入会1989年 東京転勤を契機にプロ写真家の雪松 覚先生の写真塾に入会
現在その代表 塾のグループ展を12回開催

受賞歴

日本フォトコンテスト誌のモノクロの部門で1995年の年度賞4位

コダック1996フォトコンテストのスライド部門でDyna Ex賞(準グランプリ:スライド部門の推薦)

第一原子力産業グループ

旭電化工業株式会社

株式会社荏原製作所

富士電機ホールディングス株式会社

富士電機システムズ株式会社

富士通株式会社

古河機械金属株式会社

古河電気工業株式会社

川崎重工業株式会社

株式会社神戸製鋼所

みずほコーポレート銀行

日本興亜損害保険株式会社

日本軽金属株式会社

渋沢倉庫株式会社

清水建設株式会社

双日株式会社

横浜ゴム株式会社