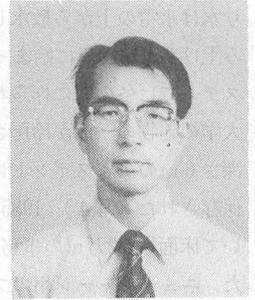


## ■ 展望・解説 ■

## エネルギー資源としての氷雪

## Snow and Ice as the Source of Energy



対馬 勝年\*

Katutosi Tusima

## 1. はじめに

冷蔵庫や機械による製氷技術が発達する以前には、天然の雪や氷が魚の保存や医療用に利用されていた。漁船の船底に水を積んで魚に出、雪山や氷室に保存された雪や氷が熱病の治療に利用された。

特に1800年代は天然氷の全盛時代で、数カ月をかけて氷が各国に輸送されていた。日本にもアメリカのセーム湖より採取された氷がボストン氷の名で輸入された時期がある。一方、国内でも各地に氷室や雪山が作られ、稲わらやもみがらなどで断熱し保存された。

わが国の積雪地帯では野菜などの越冬貯蔵、乾物、魚の冷凍保存、漬物（低温発酵）など早くから積雪寒冷環境が生活に利用されていた。その一方で、雪は交通を遮断し、家々を押しつぶす危険をもつ厄介ものであった。特に、昭和38年の豪雪では物資輸送の動脈であった鉄道と道路が寸断され、山村には孤立集落が多数発生した。このようなことから、雪害の克服が雪国の目標となり、機械除雪、融雪装置、ナグレ防止のためのスノーシェッドなどの諸施設の設備が急速に進んだ。

そして、昭和56年の豪雪ではそれまでの対策が効を奏して、たいした混乱もなく、豪雪を乗り切った<sup>1)</sup>。このことが、力となって、さらに一歩進んだ対策として雪を資源として利用しようという考えが、研究者や行政の間に芽生え、大きく成長していった。

秋に大量に収穫される野菜を雪中に長期保存、雪と水を吹き付けて作ったアイスシェル<sup>2)</sup>、夏まで保存した雪での建物冷房<sup>3)</sup>、雪のもつ冷熱と地熱などを組み合わせた雪発電<sup>5)</sup>、海水をシャーベット状に凍らせた真水の採取<sup>7)</sup>、スノーマシンで雪を降らせ、それを保存して建物冷房に利用するアイスポンド空調システムも試みられている<sup>8)</sup>。ホウ素含有水でおおわれた

原子炉格納容器もある<sup>9)</sup>。極地の海に浮かぶ氷山を曳航し水資源として利用しようという国際シンポジウムも開かれた<sup>10)</sup>。アイスポンド空調システムのように、米国では自然の寒気を有効利用して氷を作り、それを冷房や食糧貯蔵庫として利用しようという研究が盛んである<sup>11)</sup>。

わが国でも寒冷環境を利用しヒートパイプで地中に作った人工凍土の内部を食糧貯蔵庫とする試みや、氷を冷熱源とした野菜貯蔵も試みられている。スケートリンクを作る要領で水撒きと凍結を繰り返して、高さ2.5mに達する大量の水も得られて、自然の冷気も利用されている<sup>12)</sup>。東京ドームに匹敵する巨大空間を冷却し、人工雪を降らせて室内人工雪スキー場とする工事も始まり<sup>13)</sup>、一方、吸水性ポリマーを使ったスキー場<sup>14)</sup>の研究も進んでいて氷雪の利用はエネルギー資源としてだけでなく広く利用され始めている。これら、雪氷の各種利用は「利雪」と呼ばれ、活発な研究が行われ、利雪技術に関する調査報告書<sup>15)</sup> <sup>16)</sup> <sup>17)</sup> <sup>18)</sup> も出は始めている。

## 2. アイスポンド空調システム

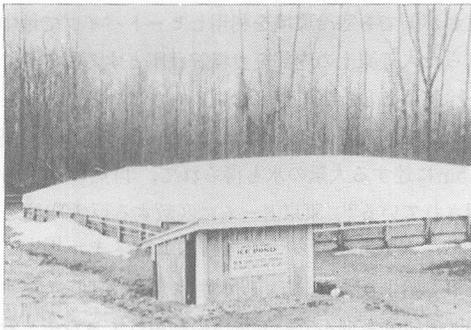
米国のプリンストン大学ではスノーマシンで雪を降らせ、それを防水シートの上に積もらせて、表面を断熱し、夏まで保存した。解け水を底の方から汲み上げて、建物内のファンコイルに通し、冷房した<sup>8)</sup> <sup>19)</sup>。戻



写1 7000㎡の氷雪をもつアイスポンド(プリンストン大、ニュージャージー州), NHK富山放送提供

\* 富山大学理学部地球科学科教授  
〒930 富山市五福3190

り水は氷雪の上から散水し、冷却させ、再び底から汲み上げた。1979年に始まったこのアイスポンド空調システムでは冬の間に作られた1000トンの氷雪で1980年に大学の建物の一部が冷房された。1982年に39×48m、深さ6mのアイスポンドに7000m<sup>3</sup>の氷雪が作られ断熱保存された(写1)。1985年にこのアイスポンドを用いて床面積1.2万m<sup>2</sup>の事務所ビルを冷房して、終了した。ニュージャージー州のプリンストンは降雪が少なく、人工雪によって氷雪を得なければならなかった。この研究の担当者であったT. TaylorはNOVAという会社に入り、バッファローのチーズ工場の空調に1982年アイスポンド(写2)空調システムを導入した。電力の節約につながることから、ニューヨーク州から補助金も出ている。



写2 カッターチーズ工場(バッファロー効外)の空調用アイスポンド, NOVAバンフレットより

日本では、多量の雪に恵まれることから、その雪を冷房の必要となる期間まで保存し、住宅の冷房や温室の空調に利用する試みが行われた<sup>19)</sup>。投入時の貯雪量は20~100m<sup>3</sup>で個人住宅の冷房が賅われている。

わが国の電力需要は夏と冬にピークがあり、冷房の普及などで夏のピークは年間で北海道電力の発電出力に匹敵するほどの増大ぶりである。個人住宅や公共建物における冷房の潜在的需要は多いことから、夏の電力ピークはさらに増大が続くことが予想される。特に猛暑に見舞われた平成2年の首都圏は綱渡り的な電力経営であったという。

電力のようにその発電燃料の殆どを海外に依存し、しかも化石燃料を燃やし尽くすという贅沢は極力避けるべきである。加えて、貯蔵のできない電力は年間を通して有効に利用されることが大事である。このようなことから、電力は年間を通して、また昼夜を通して均一に利用されることが望ましい。このような立場か

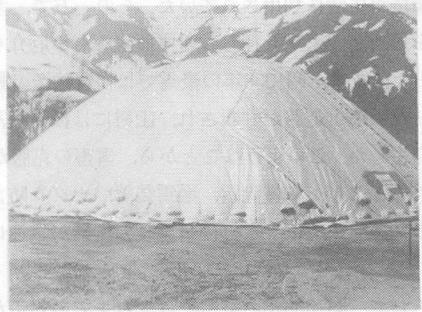
ら氷蓄熱空調システムでは深夜の余剰電力で作られた氷だけで大半の冷房がまかなわれた。電力エネルギー有効利用の社会システム構築の必要性も強調されている。

このような立場から氷雪冷房の導入による電力のピークカットの試みが国家的課題として認識されるべき時期にきていて、山形県では氷雪を未利用のローカルエネルギーと位置づけて、貯雪冷房を含む雪利用の可能性調査を進めている。

### 3. 野菜の雪中貯蔵

雪室の内部は温度0℃、湿度100%、暗黒という氷温環境を作り出す。この環境を利用して野菜や穀物が数カ月から6カ月程度の長期に貯蔵される。一方、イチゴ苗やチューリップ、スカシユリ、カノコユリ等の球根類の発芽抑制も行われている。野菜は雪室の内部でも水分を吸って成長し、みずみずしく甘みも増すことが知られている。

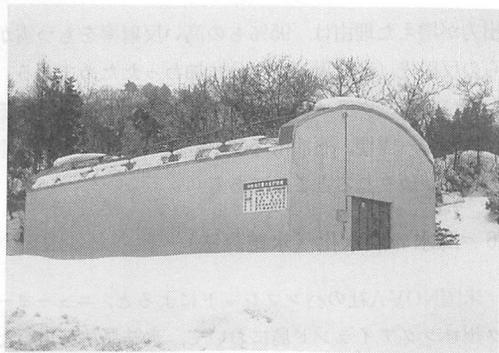
北陸農業試験場などの研究によると野菜や果物の多くは0℃に近い温度で保存されるほど鮮度が維持され長期に保存できる。新潟県湯の谷村にある食品加工メーカーはこの技術を大量の野菜貯蔵に応用した(写3)。



写3 初期における野菜の雪中貯蔵(新潟県湯の谷村)

初期には野菜の入ったダンボール箱の山の上に雪を積み上げ、厚い雪で被ったあと、グラスウールやもみからの断熱材をかぶせた。さらに日射や雨、風による融雪を防止するためアルミ蒸着したシルバーシートで被った。

最近では同食品加工メーカーや山形県の舟形町、北海道の水室システム<sup>20)</sup>のように恒久的な貯蔵庫が作られる(写4)。5000m<sup>3</sup>程度の雪を用いた野菜貯蔵も行われるようになっていく。北海道は馬れい薯の生産では国内最大を誇るが、春先には発芽して食用に使えないため、九州産などの馬れい薯に依存せざるを得なかつ



写4 恒久的雪中貯蔵庫(山形県舟形町)

た。この悩みも氷室保存で発芽が止まり長期保存が可能となった<sup>18)</sup>。

米国では自然の寒気を利用して大量の氷雪を作り、氷室として野菜の保存に利用している。

このほか岩手県沢内村のようにイチゴの苗を雪室の内部に保存し、通年にわたるイチゴ生産に効果を上げているところもある。

#### 4. 貯雪冷房

日本は世界的な豪雪地帯に多くの人口が密集している。一方、北陸のように夏日が40日におよび冷房需要の高い地域もおおい。そのようなことから雪を夏まで保存し、住宅の冷房や温室の空調に使う試みが行われている。富山県は総合雪対策の一環として、3m角のボックスカルバートを地下に埋め、外壁に厚さ30mm、内壁に厚さ100mmのスタイロフォームを張りつけ、さらに内側に防水シートを張りつけた<sup>3)</sup>。この中に密度600~700kg/m<sup>3</sup>の雪が20m<sup>3</sup>投入され、富山県上平村の村営住宅が冷房された。貯雪槽内の銅パイプを介して熱交換され水が室内のファンコイルに送られた。戻り水と汲み上げ水を混合弁で混合し、7℃に調温したのちファンコイルに送られた。この方法で平成2年の夏の冷房が行われた。

新潟県の十日町市では100m<sup>3</sup>の半地下式貯雪庫をもつ個人住宅において貯雪冷房が行われた<sup>4)</sup>。自然落下する屋根雪が5×5mの断面をもつ貯雪庫に入る。解けた水は床から掘られた深さ3mの井戸に涵養された。夏にはこの井戸から冷たい水を汲み上げて室内の3台ファンコイルに通し冷房された。15℃の地下水は除湿能力が低く冷房に役立たないが、雪で地下水が10℃以下に冷やされることによって冷房に利用できるようになる。利用できる水の量は雪解け水を使う場合より増大する。地下水の流出の問題はあるが、雪と雪解け水

だけで冷房する場合よりも効果的になることさえある。

北陸電力の実験農場では33m<sup>3</sup>の容量をもつ地下貯雪庫(写5)に保存した雪で温室の空調が行われた。内壁に厚さ100mmの断熱材と防水シートを張り、槽内に太さ20mmの熱交換用銅パイプを配置し、ファンコイルとの間に水を循環させた。



写5 空調用地下貯雪タンク(北陸電力実験農場)

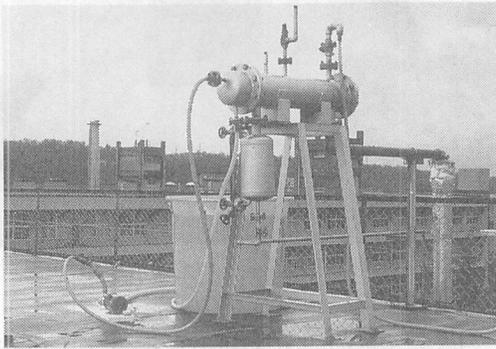
対馬ら<sup>22)</sup>の研究によれば雪解け水をファンコイルに通して行う冷房では、冷水の温度が低いほど冷房能力は高くなり、2℃では7℃のときの1.5倍の冷房能力を得ている。冷水を循環させて使う方式ではファンコイル内での温度落差は効率に影響を与えない。しかし、冷水を使い捨てとする場合、ファンコイル内での温度落差を大きくすることによって冷水はより有効に利用される。市販のファンコイルを貯雪冷房に応用するに当り、対馬ら<sup>19)</sup>は冷水の流路が最大になるように配管を変えた。管内の流速は大きくなり、総括伝熱係数の向上が期待された。加えて、水の滞留時間が長くなり、水のもつ冷熱が有効に利用されるという利点も生ずると報告している。

したがって、少ない流量で冷房が可能となり、例えば室温31℃のとき、2℃でファンコイルに入った冷水は20℃に加温されて流出した。温度差は18℃の大きな値が得られた。通常の集中冷房ではファンコイル出入口の温度は12℃と7℃、温度差は5℃程度である。したがって、使い捨て方式の貯雪冷房では3.5倍もの能力アップになる。また、同一冷房能力を得るのに、流量は3.5分の1でよいことになる。

#### 5. 雪発電

雪の冷熱と地熱や工場廃熱などの高熱源を組み合わせた温度差発電が弘前大の佐藤<sup>5)</sup>、秋田大の能登<sup>23)</sup>、富山大の対馬ら<sup>24)</sup>により行われた。発電方式には二つあり、一つは海洋温度差発電と同じ温度差発電であ

る。500Wから1000Wまでの発電試験が行われた。もう一つは、熱サイホン発電で揮発性の作動媒体が地熱などで加熱され、沸とうする。長大パイプの上端を雪で冷やして液化させ、この液体の落下する力でタービンを回し発電するものである(写6)。パイプの内部の空気を排除すると媒体は低い温度で激しく沸とうし、蒸気と液滴が混合した形で飛んでゆく。落差15mで10Wの発電が行われた<sup>26)</sup>。



写6 熱サイホン発電(凝縮部)

雪資源は海洋のように無尽蔵に得られるわけではない。それゆえ、雪を利用する温度差発電の場合その規模は自ら制約される。たとえば、効率10%としても、100kWの発電には3kg/s、1日当たり257ト、年間では9.4万トの雪が必要となる。

熱サイホン発電では気化熱の小さいものほど有利である。小さいものでは46kJ/kgのFE-5<sup>29)</sup>が知られている。落差500mで80%の効率で発電がされると仮定すると、100kWの発電には6kg/sの雪が必要となる。発電能力は落差に比例するので落差を仮に2倍の1000mにすれば、温度差発電と同じ3kg/sとなる。

管内を上昇する蒸気は上昇中に断熱膨張を続けるので、液滴を生ずる。この液滴と沸とうの際に無数に発生する液滴は上昇気流に乗って冷却部に向かう<sup>29)</sup>ので、実際に必要な冷却熱は3kg/sの雪より小さくなる。熱サイホン発電を水力発電に比べると、1kgの雪が7.3kgの媒体を液化させるのだから、熱サイホン発電は雪解け水による水力発電にくらべ7.3倍もの発電が可能になることを意味する。

太陽光発電にとっても雪が有効になる場合がある。たとえば、北陸電力がNEDOから委託を受け、立山山麓で3年間にわたって調査した結果では、山岳の斜面が雪でおおわれた冬の方が発電出力が高かった。太陽高度は低く直達エネルギーが小さいにもかかわらず

出力が増えた理由は、95%もの高い反射率をもつ雪からの反射光(乱反射)が余分に加わったためである。

雪は完璧にクリーンなエネルギーであり、急増するエネルギー需要、石油依存度の軽減のためにも雪発電の推進が望まれるところである。

## 6. 海水の淡水化(氷結晶法)

米国NOVA社のパンフレットによると、ニューヨーク州ロングアイランド島において、氷結晶法を用いた海水の淡水化が行われ、グリーンボートの飲料水に利用された<sup>7)</sup>。防水シートを張った貯水池(21m×21m×深さ1m)に海水を空中高く噴射してシャーベット状の水(全体の5%程度凍結)にして降らせた(写7)。未凍結の海水は池の底からドレインパイプで海に戻る。このようにして冬の間氷の山ができる。春になって融解が始まると解け水は残存している塩分を洗い流しながらドレインパイプから流出する。15%ほど融解したところで塩分濃度が400ppm以下になり飲料水に使われた。



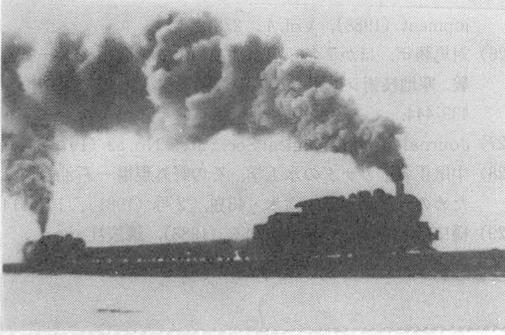
写7 海水淡水化(グリーンボート, ニューヨーク州) NOVAパンフレットより

海水が凍結するとき、純粹の水のみからできた氷と塩分が濃縮されたブラインに分離する性質が利用された。このようにして作られたシャーベット状水を遠心分離すれば、即座に真水の成分を得ることができる。

## 7. 材料としての氷雪の利用

エスキモーの住居のイグルー、雪祭りの際の各種雪像や氷像、アイスドーム、圧雪駐車場、氷上滑走路、氷上軌道などは雪や氷の材料としての利用である。

極地では人工的に圧縮された雪面(滑走路)に航空機が離着陸する。カナダには湖沼や湿地帯が多く、そこでは凍結した冬の方が交通が盛んになる。中国ハルビンの松花江では、冬季凍結した河川の上に枕木を積



写8 水上軌道 (中国ハルビンの松花江),  
久保義光による

み重ねレールを敷いて貨物列車を走らせた (写8)<sup>27)</sup>。これは水上軌道と呼ばれ、ソ連のバイカル湖上でも試みられたという。

北極海からの石油掘削にも氷のベースが使われている<sup>28)</sup>。海水の上に水を撒き、厚い氷を作って、海水を座礁させた。氷の上から海底にボーリングをして、大幅な経費の節減に役立っている。第二次大戦中には英国のチャーチル首相の「冰山空母計画」には、雪にオガズを混ぜて強化した「パイクリート」が提案された<sup>29)</sup>。凍結した土がコンクリートのように強固になる特性を利用して都心の地下や、河床の下のトンネル工事に活用されている。人工的な強化氷の開発も将来望まれるところである。

その他、アイスプラストとしての微細氷粒子の利用がある。半導体の洗浄に使われ、代替フロンとして期待される。また水の粒子を吹きつけた原子炉機器の洗浄 (アイスクリーニング) も開発されている<sup>30)</sup>。ここでは、氷は解けると水となり、固形物を残さない利点が活用されている。

## 8. おわりに

氷雪は完璧にクリーンで、毎冬再生される自然エネルギーである。永らく日本海側の豪雪地帯はこの雪から被害を受けてきたわけであるが、近年は克雪から利雪へとその対策が大きく変わりつつある。見方を変えると、100万km<sup>2</sup>の日本海は、雪資源の生産地であり、日本列島はその収穫地に当たっている。寒冷環境を利用して人工的に氷雪資源を得ることも可能である。

雪の農業利用が普及しつつある今日、次の課題は雪による冷房であろう。そして将来は雪発電その他の雪利用の実用化が課題になるものと思われる。

## 参考文献

- 1) とやまの雪研究会; 雪国新時代 (1987), 古今書院. 245-263.
- 2) 中尾信一, 粉川 牧; アイスシェルによる冬期間野菜水溫貯蔵実験, 第2回寒地技術シンポジウム講演論文集, 403-408.
- 3) 西岡哲平, 対馬勝年; 多用途蓄熱槽による建物冷房の試み, 第4回寒地技術シンポジウム講演論文集 (1989), 525-529.
- 4) 樋口俊明; 住宅の土着実用実験, 雪水北信越, 5号(1990), 32-33
- 5) エネルギー源としての雪利用研究会; エネルギー源としての雪利用に関する調査研究報告書, 秋田県商工労働部 (1984), 98頁.
- 6) 佐藤幸三郎, ほか2名; 雪・温度差発電システムの発電特性, 第3回寒地技術シンポジウム講演論文集 (1988), 1-6.
- 7) 対馬勝年; 氷雪の冷熱を利用した産業技術開発の現況. 第1回雪の国際博, ウインターシティーズ・ショーケース等海外調査団報告書 (1988). 日本システム開発研究所, 69-84.
- 8) D. L. Kirkpatrick, et al.; A unique, low-energy air-conditioning system using natural-frozen ice. Proc. 1981 Annual Meeting of the Amer. Sect. of the International Solar Energy Society (1981), 535-539.
- 9) 本堂武夫, 吉川孝三; 氷の利用技術, 新素材プロセス総合技術 (1987), 1209-1225.
- 10) International Glaciological Society; Proc. of Conf. on Use of Icebergs, Annals of Glaciology, vol. 1 (1980), 136pp.
- 11) Argonne National Laboratory; Workshop on ice storage for cooling applications (1981), (1982).
- 12) 堂腰純ほか; 自然氷の潜熱エネルギー利用に関する研究 (アイスプラント), 第3回寒地技術シンポジウム(1987), 27-30.
- 13) 井上正則, 他2名; 通年型インドア人工スキー場, 国際スキー製造技術研究会第22回発表サマリー(1989), 16-21.
- 14) 富山県; 雪を活かす, 富山県 (1984), 117頁.
- 15) 富山県; 雪対策の先進的事例調査報告書, 富山県(1989), 151頁.
- 16) 科学技術庁研究開発局; 「克雪・利雪技術の高度化に関する調査」調査報告書 (1988), 科学技術庁, 201頁.
- 17) 空気調和・衛生工学会; 融雪・雪利用委員会活動報告, 空気調和・衛生工学会 (1990).
- 18) D. L. Kirkpatrick, et al.; The ice pond production and seasonal storage of ice for cooling. The Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University, Report. No. 149, (1982), 49pp.
- 19) 対馬勝年; 氷雪冷房の現状と将来展望, 日本システム開発研究所 (1990), 40頁.
- 20) 川本周朗, 他2名; 冬期冷熱の蓄熱および利用システム「氷室計画」の概要, 第2回寒地技術シンポジウム講演論文集 (1986), 423-427.
- 21) 堂腰純; 自然氷を利用した野菜の長期貯蔵, HOCCO (北海道総合文化開発機構), 18号 (1988) 11-16.

- 22) 対馬勝年, 他 3 名; 氷雪冷房の試み, 第 3 回寒地技術シンポジウム講演論文集 (1987), 35-40.
- 23) 能登文敏; 雪を利用した温度差発電システム, 秋田の自然エネルギー, 11号 (1987), 32-39.
- 24) 対馬勝年・ほか 2 名; 熱サイホン発電, 雪氷, 49巻, 3号 (1987), 123-130.
- 25) H. Nakatani, K. Tusima; Thermo-siphon power generation system. Intern. Symp. on Cold Region Development (1988), Vol. 4, 272-278.
- 26) 対馬勝年, ほか 2 名; 温水加熱による雪発電システム試験. 寒地技術シンポジウム第 2 回講演論文集 (1986), 439-444.
- 27) Journal of Glaciological Soc.; Ice, No. 52 (1976).
- 28) 中尾正義; カナダの氷工学, その野外現場—石油探査のための人工海水床, 雪氷, 43巻, 2号 (1981), 107-114.
- 29) 樋口敬二; 新しい日本を創る (1988), 講談社.

## 協賛行事ごあんない

## 日本機械学会講習会

## 発電システムにおける制御技術の最前線

〔日 時〕 平成 3 年 6 月 13 日 (木) 9:30 ~ 16:00, 14 日 (金) 9:30 ~ 17:00

〔会 場〕 東京工業大学・百年記念館 3 階フェライト会議室

## 題目・講師

日 時	題 目	講 師
( 基 礎 )		
6 月 13 日 (木)	9:30 ~ 10:30	(1) 原子力発電システムにおける制御技術の進展 東京電力(株) 原子力建設部 副長 岩城克彦
	10:30 ~ 12:00	(2) 最近の計測・制御装置 横河電気(株) 技術統括部 第 3 技術部 玉岡 満
	13:00 ~ 14:30	(3) ファジィ・AI 制御の理論と応用 交 渉 中
	14:30 ~ 16:00	(4) デジタル制御の理論と応用 東京大学 工学部 計数工学科 教授 北森俊行
( 実 際 例 : 現 状 と 今 後 の 展 開 )		
6 月 14 日 (金)	9:30 ~ 10:50	(5) 火力発電プラントの動特性と制御 三菱重工業(株)原動技術統括室 火力プロジェクト部 計装電気技術課 課長 浅田英介
	10:50 ~ 12:00	(6) 原子力発電プラントの動特性と制御 (株)日立製作所 日立工場 主任技師 志田 総一
	13:00 ~ 14:10	(7) 水力発電プラントの動特性と制御 (株)東芝 エネルギー事業本部 電力事業部 電力技術管理部 部長 鳥井晃臣
	14:10 ~ 15:30	(8) 燃料電池発電プラントの動特性と制御 富士電機(株)技術開発推進センター 燃料電池本部 技術部 主席 古澤 明
	15:40 ~ 17:00	(9) 電力系統運用システム 関西電力(株) 系統運用部

〔定 員〕 80名

〔聴 講 料〕 会員および協賛会員20,000円 (学生員5,000円), 会員外40,000円 [いずれも教材 1 冊分  
代金を含む].

〔申 込 先〕 日本機械学会 [担当 星野美代子]