CO₂ フリー原子力エネルギー総合供給システムの開発*Development of a CO₂ Free Nuclear Total Energy Supply System

奈良林 直**

村瀬 敏博**,**

島津 洋一郎**

NARABAYASHI Tadashi MURASE Toshihiro SHIMAZU Youichiro

Abstract Nuclear power plants have a number of advantages in that "nuclear power plants are environmentally acceptable" as they do not produce carbon dioxide, and fuel loaded in a reactor core has a stockpiling effect to be advantageous in terms of Japan's energy security. This system is based on a small PWR of 30MWth thermal output. It's maximum electrical output is 10MWe. This system aims to supply all energy for life, for example, heat, electricity and hydrogen for fuel cell car, for 2000 to 3000 houses. This system assumed to be built on high latitude like Hokkaido. To confirm the simulation result, the heat transport experiment was carried out. In small size hot water pipeline using metal pipe with polyurethane thermal layer, the feed-water temperature and return-water temperature were measured. As a result, the water temperature was kept high enough, and this thermal calculation method was applied for actual size pipeline. The result of heat loss calculation was about 1 °C / 5km.

Keywords: Innovative safety PWR, Co-generation reactor, District heating, Hotwater, Pipeline

1. 緒言

北海道は冬季のエネルギー需要が大きく、我が国の中でも最も石油価格の高騰の影響を受けやすい地域である。一例を挙げると、平成17年度の札幌市の除雪費用は 180 億円に達した。除雪費用の内容は運搬、融雪、排雪である。各家庭の暖房は石油ストーブであり、多量の灯油を暖房に使用している。近年、世界各地で見られる異常気象や、原油価格の高騰を考えると、クリーンなエネルギーである原子力の有効利用を更に進展させる必要がある。とりわけ、我が国に於いては気候学分類上の「北方圏」に属する北海道が先頭に立つてこの困難を克服し、エネルギー政策のモデル地区と

なるべきであると考え。北海道で成立したシステムは我が国全体、そして世界展開できる技術となる。すなわち、我が国の国家戦略の1つである、「原子力立国」の「要」の1つとなるシステムを目指したい。

欧米では既に地球環境保全の観点から原子力エネルギーシステムの重要さが再認識され、原子力発電の反対の急先鋒であったグリーンピースでさえ、「地球環境を救うには原子力発電しか無い」と主張し始めた[1]。原子力発電フィンランドには最新鋭の欧州型加圧型原子炉(EPR)の初号機建設が決定され、原子力発電が全電力の8割を超えるフランスでも2号機が建設されることとなった。米国

* 2007.12.03 受付

** 北海道大学 大学院工学研究科 エネルギー環境システム専攻 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目
TEL:011-706-6682 FAX:011-706-6682 E-mail:tnaraba@eng.hokudai.ac.jp

*** 現在の所属、北海道ガス株式会社、札幌市中央区大通西7丁目3番地1

でも原子力リネッサンスとして原子力回帰を鮮明にした。優秀な運転実績を誇る原子炉を多数保有する米国の電力会社の株価は原油高騰下で上昇している。つまり、米国では、安全性・信頼性を重視して適切に原子力発電所のメンテナンスして設備利用率を向上させた電力会社は、発電量の増加による利益を得て、それを支持する経済のメカニズムがうまく機能している。米国アラスカ州ガリーナ村では日本が開発した小型高速炉(4S)[2]の誘致を村議会が決議し、米エネルギー省(DOE)がサポートしている。NRCの形式認定にはしばらく時間がかかるであろうが、経済産業省は既に輸出許可を出し、東芝でも2010年代後半の実用化を目指して新規の高速炉研究棟の設備投資を行った[2]。

一方、北海道と同様に「北方圏」に属し、山岳部に降雪の多いスイスでは、既に20年以上にも亘り、原子力発電所の低圧タービン抽気蒸気を熱源とし、総延長が130kmに達する給湯配管を用いて2300世帯を超える多くの家庭に供給されている。たった40世帯の小さな村にも給湯パイプラインが敷設され、全室床暖房の家屋で豊かな暮らしをしている[3-5]。

このような海外での原子力発電所からの熱供給を国内でも普及させるには、原子力の立地・建設に特に慎重に取り組んでいる現状を鑑みると、地域住民がメリットを享受し、安心して採用できるエネルギー総合供給システムにまで更に安全性・信頼性を向上させる研究開発が必要であろう。すなわち、地域住民が原子力システムに魅力と十分な安心を感じるハードウェアとシステムを構築する必要があると著者らは考え、このような基本コンセプトの構築を目指して本研究を開始した。

北海道内の地域のエネルギー需要としては、冬季の暖房、除雪(ロードヒーティング)、農業・酪農地域における暖房などの熱需要が要求がある。このような需要を想定し、熱輸送や熱利用の海外調査を行い、原子力エネルギー総合供給システムの基本概念を決定することを本研究の目的とする。

Fig.1 Total district energy supply system using nuclear for homes, industries and transportations.

2. 原子力エネルギー総合供給システム

北海道内の中規模な町に設置することとした。道内では約3000~15000世帯程度の町が散在しており、冬季の熱需要を想定すると熱出力は約30~150MWthとなる。原子炉圧力容器を開けて行う燃料交換は人手もかかり、このような大都市では人的な負担が大きいことから、燃料を一括交換可能な一体型カセット式炉心とする。これは定検時の原子炉停止期間を大幅短縮が可能である。北海道と同様に北方圏に属するフィンランドのオルキオト発電所の燃料交換時の原子炉の停止期間は約7日である。地域住民にとって原子力発電所は大切で、原子炉の停止期間を最小にするため、徹底した状態監視保全とスペアパーツの準備など様々な工夫が成されている[6]。本研究においてはこの実績に加え、カセット式炉心の採用により、燃料の1体毎の交換作業を無くして、原子炉の停止期間3日を目指す。炉心は約10年間燃料交換なしで運転できることを目指した炉心設計を行う。新規炉心燃料は、工場でカートリッジ形式に一体化したものを船とトラックにより現地に輸送して、据付ける。

現在の原子力発電所は、火力や水力発電所とのいわゆるベストミックスにより、定格出力100%で運転されているが、CO₂フリー炉を目指す場合、日負荷追従運転と、夜間の余剰電力(定格電気出力の約50%)の有効活用が必要である。熱出力が30MWthの原子炉の場合、電気出力は最大約10MWeとなるが、熱需要が大きく、定格電気出力としてはピークで約4MWeで良い。熱供給は基本的にタービンの最低圧段に近い低圧の蒸気を用いて熱供給するので、電気出力の低下はそれほど大きくない[4]。

札幌市にはJRタワーや地下街の暖房や道路の融雪を行う札幌駅南口地区・地域熱供給システム・エネルギーセンターがあり、これらの機器システム構成や需要曲線(一日や年間における熱負荷等)も参考にした。水素製造については、電気分解によるものが既に実用化され市販されている。住商エアウォーター社製IMET-60[7]を8基用いると2MWeの余剰電力で、約400Nm³/hの水素が得られる。圧縮水素を製造できるので燃料電池車用の高圧ボンベに充填できる。

このように原子炉からのエネルギー供給システムを検討していくと、Fig.1に示すように、発電、給湯・冷暖房、融雪と水素製造を同時に行い、生活に必要なほぼエネルギーの全てを供給することが可能である。安全系には、水素ガスタービンをを用いた動的炉心注水システムと蒸気インジェクタ(SI)を

用いた静的炉心注水システム[8]を採用した。春・秋の熱需要が低い時期を選択して実施する燃料交換停止時には非常用の水素ガスタービンを作動させることで継続的な発電と熱供給に対応する。水素の貯蔵タンクは、春・秋の低エネルギー需要期の3日間の水素を貯蔵できれば良い。Fig.2 に本研究で開発中のCO₂フリー原子力エネルギーシステムの3次元CADイメージ図を示す。

Fig.2 3-D CAD view of a small nuclear power plant[8].

格納容器内には原子炉圧力容器と2基の水平型蒸気発生器(SG)、加圧器1基を配置して格納容器の高さを抑えている。また、静的炉心注水系については、格納容器内上部に重力落下 ECCS (GDCS)プールを配置し、格納容器内圧が上昇した場合は、GDCSの供給水圧も上昇するようにした。蒸気インジェクタ低圧炉心注水系(SI-LPCI)はこのGDCSを水源として、炉心が約2MPaまで減圧された段階で、非常用DGやポンプ・モータといった大型の動的機器を起動しなくても、炉心注水を開始できる。このような静的機器の採用が、都市近接型の小型原子炉に必要な、住民に受け入れられる安全な熱併給炉の条件の1つであろう。

Fig.3 は、本研究の原子炉系および蒸気タービンと給復水系を含むBOP系のヒートバランスを示す系統線図である。給水加熱器は蒸気インジェクタ簡素化給水系(SI-FWH)を採用しており、給水流量は約4kg/sである。この流量の多段蒸気インジェクタの実流量試験は、東京電力と東芝で実施した、経済産業省革新的原子力技術開発公募事業および、イタリアの火力発電所の蒸気を用いたSIET社の試験で、技術開発および耐久性試験を実施済みである[8]。

Fig.3 Heat and mass balance of the small nuclear power plant (30MWth).

3. 熱供給システム

3.1 スイスの熱供給システム調査

地域共生の実例として、スイスのベツナウ原子力発電所における地域熱供給の現地調査を行った。環境先進国であるスイスではCO₂を排出する火力発電の割合は Fig.4 に示す通り、わずか1.4%しかなく、水力と原子力が主な電力供給源である[5]。Fig.5 に発電所の外観写真を示す。川の中州に建設された原子力発電所の一番手前にある建屋がポンプステーションであり、そこから2本のパイプラインが川を横切っているのが写真からわかる。Fig.6 はベツナウ発電所から周辺の町へ熱供給を行っている REFUNA 社の給湯パイプラインを示した図である。途中で分岐している二重線が給湯パイプラインで、お湯は供給側とリターン側との2本のパイプで構成されている。パイプラインの総延長は130kmに及ぶ。タービンからの抽気蒸気の一部を利用して85℃～125℃の高温水を供給し、主として家庭や工場、店舗への暖房、給湯のエネルギーを供給している。著者が現地調査を依頼した結果、Fig.7 に示す蒸気タービンの抽気蒸気を用いた熱供給用の2次熱交換器や Fig.8 に示す熱エネルギーの供給を受けている町とその町の住民である一家庭を見学することができた。

Fig.4 Electricity share in Switzerland(IAEA,2002).

Fig.5 Beznau nuclear power plant and hot-water pipelines[5].

原子力発電所からの給湯は、冬季125℃、夏季は85℃で供給され、各需要家で熱交換器を介して熱供給を行った後、リターン側（低温水側）には約70℃で戻るという循環ループとなっている。

Fig.6 Hotwater Pipelines from Beznau nuclear power plant (NOK/REFUNA)[5].

Fig.7 Heat exchanger for hotwater pipelines in Beznau nuclear power plant[5].

Fig.8 A town near the Beznau nuclear power plant and a hotwater pipeline[5].

熱供給開始からすでに 20 年以上になるが、トラブル無しで安定な運転が続いており、約 2300 世帯、約 2 万人が熱利用の需要家となっている。Fig.9 は、見学させていただいた一般家庭の車庫に設置された原子力発電所からの熱供給設備である。一番左が著者、右から 2 人目の髭を生やした背の高い方が、この家のご主人で、その左側の銀色の四角い箱が、原子力発電所から供給されているお湯と水道水の熱交換器である。原子力発電所のお湯で加熱された水道水は、熱湯となり、ご主人の右側にある白い円筒状の貯湯タンクに蓄えられる。白い貯湯タンクの右側にある 7 本の細いチューブは各部屋に供給される床暖房用の温水を送るチューブである。このようにこの家庭では、全室床暖房、浴室と台所で使用のお湯を原子力発電所からの熱供給によって賄っている。使用した熱エネルギーの使用量（温度差×比熱×流量）によって課金されるシステムであるが、昨今の灯油の高騰とは無縁の安定した価格で、CO₂ を出さずに全室床暖房の快適な生活が営まれている。灯油を全国平均の約 3 倍使用して、灯油の高騰に家計を圧迫されながら生活している北海道とは、大きな違いである。

Fig.9 A visit of a heat energy user's home.

Fig.10 Heat Pipeline for long distance heat transport.

3.2 縮小モデルによる熱輸送試験

Fig.10 に示す実機の長距離熱輸送ループのうち、各集落に設置された基幹熱交換器と各家庭内の熱交換器を除く、熱輸送パイプラインの断熱性能を確認する試験を行った。スイスのベツナウ発電所の熱輸送性能は 5km 当たりでわずか 1℃ の温度低下しか無い。50km で約 10℃ である。場合供試パイプは容易に入手できるエアコン用の発泡ポリウレタンを断熱材に用いた銅パイプを用いた。試験は厳冬期の屋外に長さ 20m のポリウレタン被覆銅パイプを用いた。試験装置は Fig.11(a) に示す通り、1kW のヒーターで温水を作り、熱輸送ループの供試配管に不凍液を混入した温水を供給し、戻り水との温度差から漏れ熱による放熱量を測定した。温度は供給側と戻り側の 2 本の熱電対で測定した。使用した供試配管の外観と寸法を Fig.11(b) に示す。

Fig.11 A small-scale hotwater test loop.

銅パイプの内径は1.7cm、外形は1.9cm、発泡ポリウレタンの外形は4.1cmである。熱電対は大気圧下の沸騰蒸気にて校正したが、測定精度は約0.1℃が限界である。熱輸送試験は、流量を1.0kg/min(1.0L/min)で実施したところ、供給側とリターン側の温度差がほぼ0℃となり、熱損失の評価が困難であったので、流量を1/10の0.1kg/min(0.1L/min)に減らして、温度差に有意な差が付くようにして測定した。流量は戻りラインの流量を容器に受け、重量法で実測し、所定の流量に調節した。-4℃の厳寒の中で、1ケース約3時間の測定を行った。

試験結果をFig.12に示す。測定開始後30分(1800s)以降の温度が安定してから温度差の時間平均値は0.4℃であった。

以上の縮小モデルによる熱輸送試験結果を以下に示す熱伝熱モデルにより解析評価を行った。

Fig.12 Temperature data of hotwater loop.

$$Q = \frac{(\theta_i - \theta_r)}{R} \quad (1)$$

$$R = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0 \alpha_1} + \frac{1}{r_2 \alpha_2} + \frac{1}{\lambda_0} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2)$$

Fig.13 Dimensions of polyurethane insulated pipe for actual pipelines heat calculation.

(1)式の Q を単位長さ当たりの管外への放熱量 (W/m)、 θ_i 、 θ_r をそれぞれ、管内温水および管外大気のパルク温度とすると、熱抵抗 R は(2)式で計算される。 α_1 は管内の温水と管内壁との熱伝達率、 α_2 は発泡ポリウレタン被覆管外表面と大気との水平管の自然対流熱伝達率、 λ_0 を銅の熱伝導率、 λ_1 を発泡ポリウレタンの熱伝導率($0.025W/mK$)とすると、発泡ポリウレタンの部分の熱抵抗が桁違いに大きい。このため、熱抵抗は管内流速の大小(すなわち $4.7m/s$ および $0.47m/s$)にかかわらず、 $R=8.4K/W$ となった。従って、管外への放熱量 $Q(W/m)$ は、管内発泡ポリウレタンの熱伝導率でほぼ決定され、(1)式より、温水と外気のパルク温度差に比例することが分かった。温水が $65^\circ C$ 、管外の大気が $-4^\circ C$ の場合、 $Q=8.24W/m$ となる。熱輸送パイプラインの供給側および戻り側の温度差(管内の温水の温度降下)は管内の滞在時間に比例する。このため、温水の流量が $1.0kg/s$ の場合の温度差は $0.039^\circ C$ 、 $0.1kg/s$ の場合は $0.39^\circ C$ となり、前者は熱電対の温度測定精度以下、後者は実験結果 $0.4^\circ C$ とほぼ一致した。この縮小モデル試験の結果、長距離を温度降下を少なくするためには、断熱材を厚くして放熱量を低減させると共に、管内流速を上げる必要があることが分かる。スイスの熱輸送パイプラインが供給管と戻り管の2本が埋設され、ループを形成しているのは管内流速を一定に保ち、温水の温度が極端に低下しないように配慮したためであることが分かる。特に、循環ポンプが停止した場合、温水の温度が時間と共に低下するため、不凍液を混入する等の凍結対策が必要である。

3.3 実機パイプラインの性能評価

3000 世帯への熱供給を3系統に分け、1000 世帯当たり $10MW_{th}$ の熱輸送を行うと1 世帯当たりでは $10kW_{th}$ 熱輸送を行うことができる。スイスのベツナウ発電所と同様に $\theta_1=120^\circ C$ の温水を送り、 $\theta_4=70^\circ C$ で戻す[3]と仮定すると、必要熱輸送量 $P(kW_{th})$ を満たす温水流量 $G(kg/s)$ は、比熱 $C_p(kJ/kg \cdot K)$ として、

$$G = P / [G C_p (\theta_1 - \theta_4)] \quad (3)$$

より、最大熱輸送量 $P=10MW_{th}$ には $G=50kg/s$ 、年平均 $P=11.3/3=3.8MW_{th}$ では、 $G=18kg/s$ となる。Fig.13 に示す配管形状および保温材の厚さで、流量が $20kg/s$ 一定の時の漏れ熱をパイプの内径を横軸にして表したグラフを Fig.14 に示

す。この計算は、(1)、(2)式で計算した。断熱材は発泡ポリウレタンで、管内は乱流熱伝達、管外の保温材の外側は外気温 0℃の自然対流熱伝達として(2)式を計算した。埋設配管なら余裕がある。

Fig. 14 Temperature decline of hotwater for various inner-diameter pipelines during 5 km transport.

配管の内径が大きくなると配管内の温水の流速が遅くなり、パイプライン内の滞在時間が長くなるため、輸送中の熱損失が大きくなることが分かる。

Fig. 12 に示した配管形状で、断熱材であるポリウレタンの厚さと熱損失との関係を計算した結果が Fig. 14 のグラフである。熱損失を 5km で 1℃程度に抑えるためには、ポリウレタンの保温材厚さを 10 数 cm から約 20cm 程度必要になることがわかる。

Fig. 15 には内径 20cm と 25cm の 2 つの内径について温度低下を示すが人差無い。一方、Fig. 16 に示すように、配管内径と圧力損失については、いずれの輸送距離でも、内径が 20cm 以下では流速が高く圧力損失が大幅に増加する。また、30cm 以上では配管を太くしても圧損は小さく、効果が出にくいことがわかる。この場合、実機の施工では JIS 250A (5B) の配管が適している。口径を大きくすると管内流速が低下して熱損失が増大するので、パイプラインは供給・戻りの 2 本敷設し、循環ループとする必要がある。

Fig. 15 Temperature decline of hotwater for various thickness of polyurethane during 5 km transport.

Fig. 16 Pressure loss of hotwater for various inner-diameter pipelines.

3.4 実機パイプラインの成立性評価

以上によりパイプラインの必要とする設計手法が揃ったので、北海道における代表的な都市を仮定して実機パイプラインの成立性評価を行った。

まず、北海道における約 3000～5000 世帯の中都市の厳冬期のエネルギー需要について、調査を行った。Web 上で道内の中都市の市町村で熱需要を公表している自治体の中から、一例として長沼町の例[9]を Table 1 に示す。長沼町の世帯数は平成 16 年度 (2004 年度) で 4638 世帯、人口 12,736 人である。長沼町では地域新エネルギービジョン策定委員会がエネルギー消費を調査集計して 3000 世帯換算で公表している。電力は北海道電力長沼営業所の集計値から年平均の消費電力は 3.2MWe、冬場のピーク電力は 4.3MWe で、年平均の 134%である。熱消費は各家庭の消費量や灯油の販売量から 3000 世帯の灯油のエネルギー換算では、年平均で 11.3MWth と算出している。冬場のピークが 22.0MWth で、年平均の約 2 倍となる。長沼町は Fig. 17 に示す通り、東西 15.5km、南北 21.1km に広がる面積 168km²の町で、札幌市まで 30km、新千歳空港まで 28km、苫小牧港まで 50km の位置にある。なお、以下の記載は、あくまで北海道における地域への総合エネルギー供給システムとしての熱需要と地域の大きさを検討のベースにするための試算であり、現時点でこの地域に原子力発電所の誘致計画などは無いことをお断りしておく。熱供給パイプラインの性能が 5km で 1℃以内の温度低下であれば、10km で 2℃、15km で 3℃、20km で 4℃、30km で 6℃、50km で 10℃の温度降下となる。

Table 1 Energy consumption of 3000 families at Naganuma Town in 2003 [9].

Energy Source	Year Average	Winter Peak	Summer Bottom
Electricity	3.2MWe	4.3MWe	2.6MWe
Oil	11.3MWth	22.1MWth	3.3MWth

Fig.17 Location of Naganuma Town [9].

この長沼町のエネルギー需要の調査結果を基に、3000 世帯の中都市に原子炉からのエネルギー供給で賄うと仮定する。22MWth のピーク熱量を供給し、かつ電気も供給すると仮定すると、将来の熱需要の伸びを考慮して熱出力 30MWth の原子炉を仮定する。30MWth の熱出力の原子炉からは熱効率 33%として 10MWe の電力が得られるが、22MWth の熱供給で 7.6MWe に低下する[3]。長沼町の場合はピークでも 4.3MWe しか必要としないので、負荷を下げた原子炉を運転するとしても最大約 3.3MWe の余剰電力が生ずる。この余剰電力は水素製造のために用いることとする。また、深夜の余剰電力は、プラグインハイブリッド車や電気自動車の普及などにより、将来的には減少し、負荷平準化すると考えられるが、最大約 2.5MWe の水素製造設備を所有することとする。熱供給パイプラインは現在のピーク値 22.0MWth に対し、将来のエネルギー需要の増加を見越して、24MWth を仮定する。原子力発電所を中心に 3 系統のパイプラインを敷設するとすると、長沼町の南北 21km の中間点で南北に各 10km、東西に 15.5km であるから、パイプラインの長さは、各

15km と仮定する。原子炉が給湯だけの目的であれば、熱需要に見合った熱出力で運転すれば良く、復水器は不要であるが、電気を供給するには蒸気タービンを使用することからヒートシンクを大気または海水とすることがある。大気をヒートシンクとする方法は冷却塔を使用するのが一般的で、欧米で内陸に原子力発電所を設置する際に広く採用されている。海水をヒートシンクにするのであれば沿岸部の苫小牧市に原子力発電所を設置して長沼町まで熱輸送することになるが、50km の距離の熱輸送が必要である。熱輸送中の水温の許容温度降下は約 10℃である。温度降下が 10℃以内であれば、Fig.10 に示す温水の初期温度 $\theta_1 = 120^\circ\text{C}$ とし、10℃の温度降下後 $\theta_2 = 110^\circ\text{C}$ となり、熱供給地域に設置の向流熱交換器(HEX 2)出口で $\theta_3 = 100^\circ\text{C}$ の熱湯が生成できる温度を維持できるからである。

4. 炉心の設計検討

本研究で開発としている原子炉は、地域にとって重要なエネルギー源となる。そこで、燃料交換時の原子炉停止期間を最小にするため、炉心は燃料中に制御棒を挿入した状態で一括交換可能な Fig.18 に示すカセット式炉心を採用した。

Fig.18 Casette-type Core.

Fig.19 Transport of a cassette-type Core.

燃料交換手順は以下の通りである。まず、原子炉圧力容器の上蓋を開けた、制御棒ガイドなどの炉心上部機器を吊り出す。次いで、燃料集合体に制御棒を全挿入した状態で一体型のカセット方式で取り出し、輸送用のキャスクに収納して運び出す。新しい燃料もカセット式で吊り込み、運転を再開する。燃料のシャフリング等の期間が削除されるため、解列に1日、炉心燃料交換に1日、起動と併入に1日、計3日で運転再開となる。フィンランドのオルキオート原子力発電所では現在でも7日間の実績があり、カセット式炉心の採用により、3日間に短縮することは十分に可能である。

このようなカセット式炉心の成立性と達成燃焼度を以下のように評価した。Fig.20 は円筒近似した炉心の実効寸法である。まず、バックリング(湾曲)は、(3)式で計算する。水の反射体厚さ δ は中性子の外挿距離 10cm と等しいと仮定する[10]。

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2.405}{R}\right)^2 = 19.11 \quad (4)$$

中性子の拡散距離 $L=0.07\text{cm}$ を考慮して、

$$L^2 B^2 = \left\{ \left(\frac{3.14}{1.24}\right)^2 + \left(\frac{2.405}{0.675}\right)^2 \right\} (0.07)^2 = 0.0937 \quad (5)$$

Table 1 で少し余裕を持たせ、10 年間、15MWth の年平均熱出力で運転し続けたとすると、炉心の燃焼度 Bu は、Fig.21 に示す燃料集合体 32 体で、ウランの装荷量が 1.97t であるので、

$$Bu = 365.25\text{day} \times 10\text{year} \times 15\text{MW} / 1.97\text{t} = 27,880 \text{ MWD/t} \quad (6)$$

となる。サイクル末期で実効増倍率 k_{eff} が 1 以上、1.05 (5% 余裕) 以下であるには、

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_{\infty}}{(1 + L^2 B^2)} \quad (7)$$

であるから、無限増倍率 k_{∞} は、

$$k_{\infty} = k_{\text{eff}}(1 + L^2 B^2) = 1.0937 k_{\text{eff}} \quad (8)$$

$$\text{より、} 1.094 < k_{\infty} < 1.148 \quad (9)$$

Fig.22 は SRAC コード[11]で解析した Fig.21

の燃料体系での無限増倍率の解析結果である。燃焼度 30,000MWD/t の時、この無限増倍率を得るには、ウランの濃縮度は 4~5% で良く、濃縮度 5% 以下の規制値を満足するので、10 年間運転可能な炉心は成立することが分かった。

Fig.20 Dimensions of the small core.

Fig.21 Layout of fuel a bundle.

Fig.22 Burnup characteristics of K_{∞} .

なお、Fig.21 で○B.P.の記号はバーナブルボイズンを入れた燃料で、初期反応度を抑制するためにウランにガドリニアを少量混ぜた燃料を配置するものである。この原子炉は通常のPWR で用いているホウ酸水を反応度調整に使用しないので、制御棒の操作無しに広範囲の自律負荷追従運転が可能である。詳細な炉心の核設計解析結果は今後実施する。

5. 水素製造

本研究で開発している原子力エネルギー総合供給システムは、電気・熱の他に、余剰電力を用いて水素製造を行う。Fig.23 は250kW の電気で $52\text{Nm}^3/\text{h}$ の水素を電気分解により製造することができる市販の水素製造装置である[7]。前述の通り、2.5MWe を用いて水素製造を行うと仮定すると、10 台で $520\text{Nm}^3/\text{h}$ の水素を製造することができる。1 日で $12,480\text{m}^3$ 、60MPa のガスタンクに充填すると約 20.3m^3 となる。ガスタンクの大きさは内径 4m、高さ 6.5m で内容積 80.4m^3 となり、4 日分の水素を蓄積できる。ガスタンクを3 基設置すれば12 日分の水素を貯蔵できる。水素の電気分解による製造効率を70%とし、熱効率50%の水素エンジンで電気に変換するとすれば効率から逆算して、2.6MWe の電力を得るのに、ガスタンク3 基の水素で、 $12\text{day} \times (0.7 \times 0.5) \times 2.5 / 2.6 = 4.0$ 日間稼働し、合わせて2.5MWth の熱を供給することができる。カセット式炉心交換に伴う原子炉停止期間は3 日であり、この間の電力供給を行うことができる。水素発電設備は万一の冷却材喪失事故の際の非常用電源としても有用である。いずれにしても、原子炉の停止時期は電力・熱需要は低い夏季を選ぶ必要がある。また、停止期間中には、他の商用電源から受電可能にしておいた方が安全上の冗長性を確保できる。

© 住商エアウオーター

Fig.23 Hydrogen generation unit[7].

6. 結 言

北海道内の中規模な町に設置することを想定した熱出力 30MWth の原子炉を用いた電気・熱・水素を供給する、CO₂ フリー原子力エネルギー総合供給システムについてシステムの概念検討を実施し、以下の結論を得た。

- (1)CO₂ フリー原子力エネルギー総合供給システムの場合、夜間の余剰電力の有効活用が必要であり、電気分解に依るものが実現可能である。
- (2)3,000 世帯の北海道の小都市のエネルギー需要調査の結果、冬場に 22MWth の熱需要ピークがあり、電気需要は4.3MWeであった。熱電併給を考慮する熱出力はこの冬場の熱需要ピークに対処するため約 30MWth 必要である。タービン効率を33%としても10MWe の電力が得られるので、4.3MWe の電力需要では、熱電併給に伴うタービン系の熱効率の低下を見込んでも余剰電力が発生する。
- (3)スイスの熱供給システムの調査の結果、REFUNA 社で既に130km に及ぶ熱供給パイプラインが敷設され、既に20 年間の運転実績と2300 世帯、工場や店舗での利用を含めると約20,000 人がその利用者になっている。熱供給は蒸気タービンの2カ所から抽気し、85℃～120℃ の高温水を季節の熱需要に合わせて供給している。このパイプラインの高温水の熱損失は5km で約1℃以内との記載の他は、詳細は公開されておらず、その成立性評価のためには実験による検証が必要である。
- (4)縮小モデルによる熱輸送実験を札幌の厳冬期に実施した結果、厚さ約2cm の発泡ポリウレタンを断熱材とした長さ20m の供試配管の場合、流速を定格の1/10 に低下にして約0.4℃の計測精度上有意な温度差を生じた。この実験結果は既存の知見の伝熱計算で予測可能であることが分かった。実験データを元に1系統当たり10MWth の熱輸送計算を行った結果、250A (5B) の鋼管で、断熱材厚さ20cm 以上の場合に5km で1℃以下の温度低下に抑えることが可能であることが分かった。パイプラインの圧力損失を給湯ポンプのポンプ動力削減のためにもパイプラインの配管は250A 必要である。更に口径を大きくすると管内流速が低下して熱損失が増大するので、パイプラインは供給・戻りの2本敷設し、循環ループとする必要があることが分かった。
- (5)炉心の設計検討の結果、燃料の一括交換を可能とする等価直径115cm、高さ104cm の円筒炉

心の場合、JAEA で開発された SRAC コードで解析した結果、ウランの濃縮度は4～5%で適切な余剰反応度(5%余裕以下)とすることが可能であることが分かった。この炉心で年間平均15MWth で運転し続けた場合、燃焼度30GWD/t に到達するまで、約10年間、燃料交換が不要とすることが可能であることが分かった。

- (6)余剰電力のうち2.5MWeを電気分解に依る水素製造に振り向けた場合、既存の電気分解に依る水素製造装置を用いて圧力60MPaのガスタンクに充填した場合、約20m³の容積となる。これを熱効率50%のガスエンジンで発電するとガスタンク3基に充填された水素で、夏季の電力需要2.6MWeを4日間賄うことができる。この水素は日常の水素自動車や燃料電池車の燃料、家庭用の燃料として利用可能な他、原子力プラントに必要な非常用発電機のエネルギー源として用いることが可能である。このような水素貯蔵は技術的には可能であるが、商用の外部電源を利用できるようにすることで安全性向上のために必要な冗長性が確保できる。

以上の通り、本研究の原子力エネルギー総合供給システムではCO₂を排出しないCO₂フリーなエネルギー源として、電力や熱エネルギーの供給、給湯・冷暖房、融雪と深夜電力による電気自動車の充電や水素製造を行うシステムである。本論文では、その基本的なシステム構成を示すと共に、各要素技術の成立性確認した。

Nomenclature

B	: Buckling	[m ⁻²]
Bu	: Burnup	[MWD/t]
D	: Diameter	[m]
H	: Height	[m]
k	: Neutron Multiplication Factor	[-]
Q	: Heat loss per length	[W/m]
R	: Radius	[m]

Greek letters

α	: Heat transfer rate	[kW/m ² K]
δ	: Reflector thickness of core	[m]
λ	: Thermal conductivity	[kW/mK]
θ	: Temperature	[K]

Subscripts

0	: Pipe inner	1	: Pipe outer
2	: Insulator outer	eff	: Effective
∞	: Infinite		

謝辞

本研究遂行にあたり、ご助言を賜りました北海道大学 杉山憲一郎教授および角川総合研究所の魚井一生氏に謝意を表す。特に、対話会を開催いただき、稔り多い討論を重ねて、有益なご助言をいただいた北海道木古内町の皆様始め、道内各地の市町村の皆様へ深謝致します。本研究は主に科学研究費補助金基盤(B)「科学研究費補助金(19360421)」によって実施した。

参考文献

- [1] Moor, P., Greenpeace Founder Makes the Case for Nuclear, Journal of Atomic Society of Japan, Vol. 47, No.9, 599(2005).
- [2] Kobayashi, M., et al., Fast Reactor and Other Advanced Energy Technologies, Toshiba Review, Vol.62, No.11, 28-31 (2007).
- [3] Fischer, E., "Nuclear District Heating: The Swiss experience", District Energy, 90 [3] (2004).
- [4] Graf, M., "REFUNA AG", Munda-verlage, Grugg (2004).
- [5] Sugiyama, K., et al., Nuclear District Heating in Switzerland, J. of the Atomic Energy Society of Japan, (in Japanese), Vol.48, No.2, 43-38, (2006).
- [6] Mizumachi, W., Research on Foreign Inspection System of Nuclear Power Plant, Technical Section on Optimization of Nuclear Safety Regulation, Power and Energy System Division, Proc. of JSME annual meeting (2006).
- [7] Hydrogen Generation System, Model:IMET-60 Sumisyo-AirWater Web Site (http://www.awi.co.jp/newsrelease_disp_detail.php?year=2003&id=220) (2006).
- [8] Narabayashi, T., et al., Development of Technologies on Innovative Simplified Nuclear Power Plant Using High-Efficiency Steam Injectors, Proc. of 14th Int. Conf. on Nuclear Engineering, CD-ROM, Paper No. ICONE14-89753 (2006).
- [9] Long Term Energy Vision in Naganuma Town, Web Site (in Japanese), <http://www.maoi-net.jp/gyosei/newenergy2/matome.htm>
- [10] Critical Experiment for Kyoto University Critical Assembly (KUCA), Textbook for Student Experiments, 21-22 (2005).
- [11] General-purpose Reactor Core Analysis Code (SRAC), JAEA Web Site (in Japanese), (<http://www.jaea.go.jp/jnc/info/bosyu/kobo14/14code.htm>) (2004).