研究論文

パッケージリアクタの開発

茶木 雅夫^{1,*}, 日野 哲士¹, 松浦 正義², 守屋 公三明², 日比 宏基³,
瀧本 洋樹³, 坂場 弘³, 雨夜 隆之^{4,†}, 沼田 守⁴

Development of the Package-Reactor

Masao CHAKI^{1,*}, Tetsushi HINO¹, Masayoshi MATSUURA², Kumiaki MORIYA², Kouki HIBI³,
Hiroki TAKIMOTO³, Hiroshi SAKABA³, Takayuki AMAYA^{4,†} and Mamoru NUMATA⁴

¹Power & Industrial Systems R & D Laboratory, Hitachi, Ltd., 7-2-1 Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 319-1221, Japan

²Hitachi Division, Hitachi, Ltd., 3-1-1 Saiwai-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 317-8511, Japan

³Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 3-3-1 Minatomirai, Nishi-ku, Yokohama 220-8401, Japan

⁴JGC Corporation, 2205 Narita-cho, Oarai-machi, Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki 311-1313, Japan

(Received April 3, 2006 and accepted in revised form August 30, 2006)

A new small reactor concept named Package-Reactor has been developed through a joint research of Hitachi, Ltd., and Mitsubishi Heavy Industries. Several key design of its nuclear steam supply system have been investigated, taking into account both Boiling Water Reactor (BWR) and Pressurized Water Reactor (PWR) technologies. The Package-Reactor is a stand-alone energy supply system, and is designed to attain high reliability, high safety, good maintainability, good operability and low construction cost. To achieve these aims, the reactor adopts natural-circulation core cooling systems. The reactor has no active devices inside its high pressure boundary. Combining a turbine electric power generation and biomass refining, which is supported by JGC Corporation or chemical heat pipe systems attains a perfect base load operation. The whole system is simple and small to be easily constructed with a very short period even at remote regions with poor infrastructures. The Package-Reactor is an innovative nuclear power plant concept to pioneer and develop new markets of the nuclear power business.

KEYWORDS: *small reactor, natural circulation, active reactivity control free, long period operation, passive safety system, chemical heat pipe, biomass refining*

I. 緒 言

地球温暖化等の環境問題が深刻化する中で、温暖化ガスの発生がほとんどない原子力プラントの重要性が今後ますます高まると考えられる。そのような状況の中、原子力プラント開発は、送電網が発達している地域を対象に主に発電量の増大による経済性向上の観点から実施されてきた。その一方で、世界的な生活水準の向上などにより、離島あるいは海外のインフラ未整備地域などでのエネルギー需要が今後高まると予測される。このような地域では、長距離送電網の整備は非現実的であり、また全体としてのエネルギー需要量も少ないために、小容量・独立型のエネルギー供給システムが必要とされる。これまではディーゼル発電やガスタービン発電プラントなどの化石燃料発電システムが用いられてきた。しかしながら、そのような地域においては、過酷な自然条件での燃料輸送および大型燃料備蓄設

備が必要となる場合が多く、燃料の輸送・備蓄コストの割合が高くなる傾向があり、地域開発を妨げる要因のひとつとなっていた。したがって、温暖化ガス発生抑制の観点だけでなく、燃料の輸送・備蓄の点でも優れる原子力プラントは、地域開発におけるエネルギー供給システムとしても有利性があると期待される。

また、近年、産業廃棄物を処理して新たな資源を取り出す、いわゆる「資源リファイニング」システムの開発が活発になっており、今後、そのシステムのためのエネルギー需要が高まることが予想される。エネルギー源として化石燃料を使用した場合、得られた資源の一部を再度、資源リファイニング自体に使用することになり、資源を再利用するメリットが減少する。これに対し、原子力プラントをエネルギー源として用いることで、可搬が困難な原子力エネルギーを可搬可能な化学エネルギーに置換することができるため、資源再利用効果を高めることができる。しかしながら、資源リファイニングに必要とされるエネルギー量は既存の原子力発電プラントの容量に比べて大幅に小さく、超小型の原子力プラントが必要となる。

以上の観点から、㈱日立製作所および三菱重工業㈱では「パッケージリアクタ」と呼ぶ熱出力10~50 MWtクラスの超小型軽水炉を開発し、さらに、100 MWtクラスへの

¹ ㈱日立製作所 電力・電機開発研究所

² ㈱日立製作所 日立事業所

³ 三菱重工業㈱

⁴ 日揮㈱

* Corresponding author, E-mail: masao.chaki.dx@hitachi.com

† 現在、文部科学省 (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology)

出力向上も視野にいれている^{1~8)}。また、日揮梯と共同して資源リファイニングシステムとの融合を図った⁹⁾。パッケージリアクタの開発においては、小型・独立型のエネルギー供給システムとして、経済性、安全性、運転性において化石燃料発電プラントと競合できるシステムを目標とし開発を進めてきた。パッケージリアクタは、最大の開発課題である、発電容量が小さいことで発電コストが割高になるスケールデメリットの克服のため、建設コスト低減を目的とした設備のパッケージ化や、運転コスト低減を目的とした反応度制御フリー運転、エネルギー効率向上を目的とした熱電併給システムなどを特徴とする。

本論文では、パッケージリアクタの基本コンセプトと技術的成立性に関する主要な検討結果について述べる。

II. パッケージリアクタの基本コンセプト

パッケージリアクタはスケールデメリット克服のためのコスト低減と、運転性・安全性向上を目指し、以下を基本コンセプトとした。

- 設備のパッケージ化
- 圧力バウンダリー内の動的機器の排除
- 反応度制御フリーでの5年以上の炉心連続運転
- 安全系の簡素化
- 熱利用システムとの連携

以下、各コンセプトに対するパッケージリアクタにおける開発方針を述べる。

1. 設備のパッケージ化

従来、電気出力数100 MWe級の中小型炉においてもモジュール化が図られていた。しかし、パッケージリアクタは社会インフラの整備状態が悪い地域にも設置可能とすることを目標としている。このような地域の場合、港湾までは輸送できても、そこからの地上での輸送インフラの制約が大きいことが想定される。そこでパッケージリアクタでは、すべてのモジュールをトラックで輸送可能な単位でパッケージ化可能とした。エネルギー発生系の格納容器や炉心を構成する燃料を内包する圧力管などはトラックで輸送可能なモジュールまでは工場を組み立てる。これにより、設置サイトでの作業を配管作業とエネルギー転換系の設置のみとでき、サイトごとに必要となる工事設備等を大幅に削減可能とした。具体的には、エネルギー発生系はトラックによる輸送が可能なユニットに分割して工場で生産し、数回の輸送のみ対応可能とする。また、据付け工事は格納容器ユニットを置く基礎も含めて基本的に半年程度で可能となり、化石燃料発電プラントに近い期間でできる。このコンセプトにより、港湾インフラや地上輸送インフラ等の社会インフラが十分に整備できていない地域でも原子力プラントを建設可能とした。

なお、このコンセプトと、パッケージリアクタの目標熱出力規模(10~100 MWt程度)は合致するものとなっている。

る。

2. 圧力バウンダリー内の動的機器の排除

従来の軽水炉では、高温高圧の原子炉系の中に循環ポンプや制御棒等の動的機器を設置していた。パッケージリアクタでは、初期投資およびメンテナンスコスト抑制によるコストダウンをスケールデメリット克服の大きな柱としている。そのため、冷却水の循環方式をBWRで実績のある自然循環方式とした。これにより循環ポンプとその制御系や電源設備を不要とした。また、制御棒および制御棒駆動装置も大気圧下設置とし、さらに、運転時の制御棒操作を不要とした。制御棒は緊急停止時にはトリップ信号により駆動系との電磁石による接続を自動遮断し、重力落下させる。通常停止および起動時はモータにより制御棒を挿入したり引き抜いたりする。これらの操作も引抜き速度を遅く設定すれば基本的には自動化可能である。このように、圧力バウンダリー内の主要動的機器をすべて排除することにより革新的簡素化を可能とした。これらにより、エネルギー発生系のメンテナンス作業は燃料交換以外不要となる。これらの工夫により、建設およびメンテナンスコストの大幅低減を可能とした。

3. 反応度制御フリーでの5年以上の炉心連続運転

パッケージリアクタがターゲットとする市場である離島や海外のインフラ未整備地域では、化石燃料の輸送および貯蔵コストはインフラが整備されている地域より大きくなる。原子力プラントの場合、燃料の輸送、貯蔵にかかる費用はもともと小さいが、連続運転期間が短いと交換用燃料の輸送や燃料交換に係わる費用が増加する。このため、パッケージリアクタでは燃料交換、機器メンテナンスなしで現行燃料の炉内滞在実績等から5年以上の連続運転を目標とした。さらに、運転員の負担軽減の観点から、反応度制御フリー運転可能とし、メンテナンスコストとオペレーションコストを低減するとともに、プラント利用率の向上によってもコストを低減できる。

4. 安全系の簡素化

離島および海外のインフラ未整備地域への設置を前提にしたパッケージリアクタにおいては、運転の容易さと事故時の安全性についても現行軽水炉以上のものが必要である。そこで、パッケージリアクタでは万が一の異常時の原子炉停止システムとして、制御棒が落下しない場合はラプチャーディスクを破壊信号により破壊し、ホウ素球を重力で落下させるシステムとした。また、冷却水喪失事故時の炉心の崩壊熱除去は、蒸気もしくは空気其自然循環で蒸気発生器と圧力バウンダリーに伝え、圧力バウンダリーの冷却は水もしくは空気其自然対流により可能とした。圧力バウンダリーの冷却を自然対流により可能とするためには、圧力容器内体積に対する圧力容器表面積の割合を大きくす

ることが必要であり、圧力管は小型なものとした。これにより安全性が向上するとともに、安全系に高圧注水系が不要となり、システムの簡素化により建設コストとメンテナンスコストを低減できる。パッケージリアクタはこうにコスト低減を図りつつ、固有の構成および安全コンセプトにより基本的に緊急避難を必要とする事故を起こさない、化石燃料発電プラントと同等基準で運用できるコンセプトとなっている。

5. 熱利用システムとの連携

2次系での熱利用を考慮し、1次系(原子炉系)の圧力を現行PWRと同じ15.5 MPaの高圧とし、間接サイクルとした。これにより、熱利用効率が向上し、システムのエネルギー効率を向上できるばかりでなく、1次冷却水は閉ループ内を循環するのみとなり、放射線管理が容易となる。具体的な熱利用システムとしては従来から知られているケミカルヒートパイプを利用したシステムと、本研究で新たにバイオマス等のリファイニングによるシステムを開発した。超小型炉では燃料経済性が悪化すること、遠隔地では送電網の関係で大規模発電の恩恵を受けられないことなどを総合的に勘案し、熱電併給により総合エネルギー利用効率60%以上を目標とする。これらの熱利用システムにより、小型炉で課題とされている1次系(原子炉系)の負荷追従運転を不要とできる見通しを得た。

III. 全体システム概要

第II章で説明したコンセプトに基づいて開発したパッケージリアクタの概観をFig. 1に示す。炉心部は「カセ

ット」と呼ぶ燃料を内包した12体のジルカロイ合金製圧力管で構成される。また3体の蒸気発生器が設置され、4体のカセットが1体の蒸気発生器に接続される。カセット周囲には中性子経済性向上のための黒鉛反射体を配置し、その外側に水遮蔽体槽を配置する。水遮蔽体槽は、非常時にカセット外側を冷却するための水の供給源としても利用する。また、黒鉛反射体と水遮蔽体槽の上部に配置されるメンテナンス台は、非常用原子炉停止系であるホウ素球を貯蔵したタンクを内蔵し、上部方向への中性子遮蔽の機能も有する。制御棒および制御棒駆動装置は圧力管外の大気圧下に設置される。制御棒は炉心上部からワイヤによって吊り下げられ、原子炉運転中は常に全引抜き状態となり、原子炉停止時にカセット間にモータ駆動で挿入される。格納容器は高さ約10 m、直径約5.5 mの鋼製である。格納容器内は大気圧状態であり、運転中に作動する動的機器がないため、3～5年程度の期間、格納容器内をメンテナンスフリー化できる可能性がある。

Fig. 2にエネルギー供給システム概念を示す。1次系圧力、冷却水炉心出口温度は現行PWRと同じ15.5 MPaおよび345℃である。蒸気発生器からの供給蒸気圧力は5 MPa、温度は289℃である。蒸気発生器で発生した蒸気は蒸気ヘッドで集約され、蒸気タービンに送られ発電する。蒸気タービンとしては背圧タービンを用いる。背圧タービン自体の電気へのエネルギー変換効率は低い、排気蒸気温度を100℃以上にできるため、熱利用系に対する自由度が向上し、総合的な熱利用効率を向上できる。

パッケージリアクタはエネルギー発生系のシステムを簡素化することで建設コストを低減している。さらに、運転

Fig. 1 Outline of Package-Reactor system and configuration of multi-cassettes/single-steam-generator system

Fig. 2 Conceptual diagram of a stand-alone energy supply system with the Package-Reactor

コスト低減の観点から、エネルギー発生系では原子炉熱出力を制御しない。エネルギー需要の変動に対しては、蓄電池やケミカルヒートパイプ等による蓄熱・放熱や、資源リファイニング量の調整により対応する。熱利用システムについては、第 VI 章にて詳細に説明する。

IV. 炉心システム

第 II 章の基本コンセプトに基づく、炉心設計コンセプトを詳細にまとめると以下の 3 つとなる。

(1) R & D コストおよび設備投資の低減

パッケージリアクタのような超小型炉は遠隔地等の比較的規模の小さなユーザが対象になるため、開発に大きな投資が困難と考えられる。そこで、現行の BWR および PWR の技術を最大限活用することで R & D コストを低

減し、既存の製造設備や燃料再処理施設を大きな変更なく利用できるようにする。

(2) 建設費低減

自然循環システムを採用し、制御棒および制御棒駆動装置を大気圧下設置として高圧下で作動する動的機器を排除する。これにより機器およびシステムを簡素化でき、建設コストを低減できる。

(3) 運転・メンテナンスコスト低減

プラント利用率を向上させるため、5 年以上の連続運転を目標とする。また運転員の作業量を減らし、運転コストを低減するため運転中の制御棒操作を不要とする反応度制御フリー炉心とする。

以上のコンセプトのに基づき設定した炉心設計条件を

Table 1 に示す。現在の燃料製造、輸送および再処理施設での制限を考慮し、ウラン濃縮度の上限を 5 wt% とした。また、燃料棒についても現行技術活用の観点から、基本的に現行 PWR の燃料棒と同じ仕様とした。

カセット配置を **Fig. 3** に示す。炉心は 12 体のカセットにより構成される。カセットは蒸気発生器と切り離しが可能であり、運転サイクル後にカセットごと新燃料と交換する。カセット外径は約 40 cm であり、圧力管材料としてジルカロイ合金を採用した。これは、圧力管材料としてジルカロイ合金より安価なステンレスを用いた場合と比較し、強度の観点から、肉厚を約 3 倍とする必要があるが、肉厚が増大しても中性子吸収量が約 1/3 になるためである。中性子吸収量の減少により燃料経済性、具体的には燃焼度が向上するとともに、カセット間に挿入する制御棒の価値が増加する。カセット配置は据付性とメンテナンス性を考慮して設定した。**Fig. 3(b)** に示すように、他のカ

セットと干渉することなくすべてのカセットに対して炉心外側から配管を直線的に接続することが可能である。

パッケージリアクタにおける制御棒(以下、制御棒クラスタ)の構成を **Fig. 4** に示す。制御棒クラスタは、現行 BWR の制御棒に用いられているものと同様な、ステンレス鋼管に B_4C 粉末を充填した吸収材管を、円筒状に配置した構成としている。運転時にはすべての制御棒クラスタが引き抜かれ炉心上部に待機し、炉停止時には 12 体すべてのカセットそれぞれについて、制御棒クラスタがカセット周囲を取り囲むように挿入される。この構成ではカセット間には 2 つの制御棒クラスタが存在し、カセット間の核的結合を遮断する。また、カセット間に 2 つの制御棒クラスタが存在することから、1 ロッドスタック時にもカセット間には 1 つは制御棒クラスタが存在し、1 ロッドスタック時にも炉心を効率的に未臨界に維持できる。

パッケージリアクタでは、炉心熱出力の変化を許容することで、減速材ボイド反応度フィードバックにより反応度を制御し、運転中の制御棒による反応度制御を不要とする。具体的には、熱利用システムで許容される範囲で炉心熱出力を変化させ、カセット内のボイド率を変化させる。炉心部は負の減速材ボイド反応度フィードバック特性を持つので、カセット内のボイド率変化により一定範囲で反応度の自己制御が可能である。パッケージリアクタの開発に際して、カセット内の自然循環特性評価機能を含む熱水力コードを開発した。二相流モデルとしてはカセット内が 15.5 MPa と高圧であることから、このような高圧条件下で予測精度の良い均質流モデルを用いた。また、カセット内の炉心部は軸方向 1 次元モデルとした。この解析コード

Table 1 Core design conditions

Items	Specifications
Thermal output	25 MWt
Effective core height	3.7 m
Core cooling system	
Pressure	15.5 MPa
Inlet temperature	340°C
Outlet temperature	345°C
Fuel	
Material	UO ₂
²³⁵ U enrichment	Max. 5.0 wt%
Cladding	
Material	Zircaloy
Outer diameter	9.5 mm
Pressure tube	
Material	Zircaloy
Thickness	30 mm
Shroud	
Material	Zircaloy
Thickness	5 mm
Burnable absorber material	Gd ₂ O ₃
Chemical shim	Not needed

Fig. 4 Schematic of the control rod cluster

Fig. 3 Schematic of the cassette arrangement (horizontal view)

で Table 1 に示す炉心仕様で炉心熱出力を変化させた場合のカセット内の燃料部分のボイド率変化評価結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、炉心熱出力変化 $\pm 10\%$ でカセット内の燃料部分のボイド率が約 5% 変化することがわかる。また、3次元モンテカルロ核特性評価コード MVP-BURN¹⁰⁾による解析によると、ボイド率が約 5% 変化するとパッケージリアクタの炉心システムの反応度変化は約 $0.5\% \Delta k/k'$ である。したがって、今、仮に熱利用システムからの炉心熱出力変化許容幅が $\pm 10\%$ とすると、反応度制御フリーとするためには運転サイクル中の燃料の燃焼に伴う反応度変化を $0.5\% \Delta k/k'$ 以内に抑制する必要があることになる。

以下、可燃性毒物として、BWR および PWR 燃料で通常使われる Gd_2O_3 を加えたウラン燃料(Gd 燃料)を使用した場合について、反応度制御フリー運転の実現性の検討結果を述べる。炉心特性評価においては、核熱フィードバックを考慮するため、開発した熱水力解析コードと3次元

モンテカルロ計算コード MVP-BURN による全炉心核計算を組み合わせた解析システムを構築した。構築した解析システムを Fig. 6 に示す。MVP-BURN により中性子実効増倍係数(以下、 k_{eff})および出力分布を計算し、この出力分布を使って、熱水力解析コードによりカセット内ボイド率分布を評価する。得られたカセット内ボイド率分布を用いて再び MVP-BURN により k_{eff} および出力分布を計算し、これを k_{eff} が収束するまで繰り返す(核熱カップリング計算)。 k_{eff} が収束した後、MVP-BURN により燃焼計算を実施し、次の燃焼ステップにおいて再び核熱カップリング計算を行う。

炉心全体の熱出力を現状、リファレンスと設定している 25 MW に固定した場合の、燃焼に伴う反応度変化の評価結果を Fig. 7 に示す。カセット当たり総燃料棒本数256本のうち20本に、3種類の異なる Gd 濃度の Gd 燃料棒を配置した。運転期間約10年まで、反応度変化はほぼ $0.5\% \Delta k/k'$

Fig. 5 Change of void fraction with thermal power output change

Fig. 7 Reactivity change with burn-up with Gd-rod (zero means critical point)

Fig. 6 Core characteristics analysis system

kk' 以内に収まっている。Gd 濃度種類を増やすなど設計を最適化することにより、反応度変化をさらに小さくすることも可能である。本研究により熱出力 $\pm 10\%$ の変化を許容すれば、反応度制御フリー運転が核熱水力特性上、可能な見通しを得た。なお、PWR 条件下での5年以上の連続運転については燃料棒の健全性の観点からの実証が必要である。

パッケージリアクタの炉心特性を Table 2 にまとめる。濃縮度上限 5 wt% の制限下で5年以上の連続運転が可能である。出力密度は約 8 MW/m^3 と現行 BWR の約 $1/5 \sim 1/6$ で、大きな熱的余裕を有する炉心となっており、50 MWt 程度までは出力増加可能な炉心設計となっている。1 ロッドスタックマージンは運転期間を通して現行の設計基準である $1\% \Delta k$ よりも十分に大きくなっている。パッ

Table 2 Summary of core characteristics

Item	Value
Thermal output	25 MWt
Operation period	>5 year
^{235}U enrichment	5 wt%
Uranium inventory	5.5 t
Power density	8.1 kW/l
Av. linear heating generation ratio	0.7 kW/ft
Av. void fraction	$\sim 30\%$
H/U	~ 6
Discharged exposure	$\sim 16 \text{ GWd/t}$
One rod stuck margin	$> 10\% \Delta k$
Void reactivity coefficient	$\sim -15 \times 10^{-4} \Delta k/k/\%V$

ッケージリアクタの場合、カセット内に制御棒クラスタが存在しないので、カセット外径を増加させて、カセット内により多くの燃料を装荷すると炉停止性能は低下する。しかし、現在の設計では1 ロッドスタックマージンに十分な余裕があるので、この余裕を活用し、カセット外径を増加させるなどして、100 MWt クラスへの更なる出力向上や燃料経済性の向上も今後検討していく。

V. 安全系

パッケージリアクタには崩壊熱除去系に再循環ポンプなどの動的機器がなく、また軽水炉の特徴として負のボイド反応度係数を持つ。パッケージリアクタの安全系はこのような特徴に加えて、重力を利用した静的安全システムを採用しており、既存の軽水炉プラントと比較しても安全性が高いといえる。長期運転を前提としていること、また、自然循環により炉心を冷却する観点から出力密度を小さくしており、過渡、事故時の安全性についても大きな余裕がある。

Fig. 8 に配管破断時の炉心冷却方法について示す。まず、複数の蒸気発生器を有し、それぞれが独立したループであることから、仮に一つの1次系ループにおいて配管が破断した場合でも、他のループに接続されたカセット内の燃料は健全に冷却される。1次系が破断した系統については、蒸気発生器による熱除去が不可能になり、蒸気が格納容器内に放出されることにより格納容器内の温度が上昇する。パッケージリアクタでは、黒鉛反射体の外側に配置された水遮蔽体槽と炉心部を隔てる壁に低融点合金フィルム部を設けている。格納容器内の温度上昇に伴い、この低

Fig. 8 Heat removal system

Fig. 9 Reactivity shutdown system

融点合金が溶け、カセット間に冷却水が注入され、カセットを外部から冷却する。カセット内径が約 30 cm と小さいことから、カセット内部の空気自然対流および輻射による熱伝導とカセット外部からの水冷却により炉心部の冷却が可能である。2 次系の配管破断に関しては、背圧タービンを経る主ルート以外は直接熱利用系にバイパスできる系統分離がなされており、蒸気発生器 2 次側の 2 系統化により、安全に崩壊熱除去が可能である。主蒸気管破断などによりすべての蒸気発生器での除熱ができなくなる事象についてはカセットの 1 次系が破断したときと同様に水遮蔽体槽の水により冷却される。

Fig. 9 に炉停止システムの概要を示す。炉停止システムは制御棒クラスタとホウ素球投入系の 2 系統で構成される。通常の炉停止時には制御棒クラスタが圧力管間に挿入される。制御棒クラスタは 1 ロッドスタック時にも炉心を十分に未臨界に維持する能力を持つ。制御棒クラスタがスクラムに失敗した場合、メンテナンス台に貯蔵されたホウ素球が重力落下によりカセット間に投入される設備を設けており、この機能単独で炉心を未臨界に維持することが可能である。また、通常運転時には、制御棒クラスタは全引き抜きされた状態のため、制御棒誤引抜き事象を考慮する必要がない。なお、制御棒クラスタおよびホウ素球投入系のどちらも大気圧下に設置されるため、機器の簡素化と信頼性向上が可能である。

VI. 熱利用系

1. ヒートパイプシステム

パッケージリアクタの熱利用系の特徴の一つがケミカルヒートパイプシステムの採用である。ケミカルヒートパイ

プシステムは、エネルギー損失の少ない長距離熱輸送手段として検討した。Fig. 2 に検討したシステム概要を示す。本システムでは、パッケージリアクタからの熱を利用し、吸熱反応であるメタノール分解反応により水素および酸化炭素を生成し ($\text{CH}_3\text{OH} \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$)、パイプラインにより熱需要地に送り、そこで発熱反応であるメタノール生成反応 ($\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$) により熱を取り出し利用する。パイプライン上に気体を一時的に蓄積するタンクを設置することでエネルギー需要量の変動に対応できる。メタノール分解反応には 150°C 以上の高温水が必要であり、蒸気発生器からの主蒸気を供給する。この高温熱利用蒸気流量を主蒸気から分流させることによりタービン供給蒸気が減少し、発電量は少なくなる。電力需要は時間帯で変化するため、この電力需要に応じた大きな負荷変動は高温熱利用蒸気流量で調整することが可能である。

2. バイオマスリファイニングシステムへの適用

パッケージリアクタの熱利用のもう一つの形態として、バイオマスプラント熱源への応用を検討した。パッケージリアクタで発生する熱エネルギーの温度域はバイオマスプラントで使用する温度域にあるため、パッケージリアクタの熱を直接利用することができる。インフラ未整備の離島でバイオマスプラントを稼働させるケースを想定し、実際にそのケースが成立した場合のプラント規模を試算した。

(1) エネルギー供給/消費モデル

エネルギー需給モデルを Fig. 10 に示す。原子炉は熱と電気を供給し、バイオマスプラント、海水淡水化プラント、そして居民がそのエネルギーを使用するモデルとした。

Fig. 10 Energy supply/consumption model

Table 3 Energy supply/consumption data from Package-Reactor (50 MWt)

Steam extraction rate : η (%)	Electricity (MW)	Steam (160°C) (MW)
0	10	0
10	9	3
20	8	6
30	6	9

(2) データセット

(a) エネルギー供給系

Table 3 にパッケージリアクタ (50 MWt) の抽気割合に対する熱出力と電気出力の関係を示す。抽気割合を 0% から 30% に増やすと、電気エネルギーが 10 MW から 6 MW に減少し、蒸気は 0 MW から 9 MW に増加する。1 次冷却水の抽気割合を調整することにより、隣接するバイオマスプラントで必要な量の熱エネルギーを取得することができる。余剰なエネルギーは電気エネルギーに変換し需要地へ移送する。

(b) エネルギー需要系

油脂生産バイオマスから搾油・加工してディーゼル油 (バイオディーゼル) とグリセリンを製造するバイオディーゼル製造プラントと、発生する絞り粕 (リグノセルロース) を原料にエタノール (バイオエタノール) を製造するバイオエタノール製造プラントを選定した。このシステムは実用化されていないが、今後、実用化するものと仮定した。住民への飲料水供給は逆浸透膜法による海水淡水化プラントを選んだ。Table 4 にこれらのプラントのエネルギー需要と住民に必要なエネルギー需要を記載する。

(3) 試算結果

Table 5 に試算結果を示す。合計熱出力 100 MWt のパッケージリアクタ 2 組 (25 MWt $\times$ 4 機や 50 MWt $\times$ 2 機等) と熱出力 50 MWt のパッケージリアクタ 1 台を設置することにより、1 日当たりディーゼル油 200 t、エタノール 35 t、グリセリン 20 t の生産が可能である。発生する

Table 4 Energy consumption data

	Capacity	Electrical energy (kW)	Heat energy (kW)
Biodiesel production plant	100 Mg-Feedstock /d	220	1,800
Bio-ethanol production plant	100 Mg-Feedstock /d	740	2,400 ^{a)}
Desalination plant (R/O type)	1 m ³ /h	5	0
Electrical appliance for residence	1 person	0.7	0
Potable water for residence	1 person	0.04 ^{b)}	0

^{a)} A third of total consumption (two thirds by utilization of waste biomass with boiler)

^{b)} Consumption of potable water: 0.2 m³/d/person

Table 5 Result of plant scale trial calculation of biomass industry zone

Item	Unit
Package reactor	
$\eta^a) = 0\%$	100 MWt
$\eta^a) = 20\%$	100 MWt
$\eta^a) = 30\%$	50 MWt
Biomass products	
Diesel oil	200 Mg/d
Ethanol	35 Mg/d
Glycerin	20 Mg/d
Biomass farm	
Area	2 km ²
Employment	30,000 persons
Capacity of desalination plant	10,000 m ³ /d
Population	50,000 persons

^{a)} η : Steam extraction rate

電力は、5 万人の居住に必要な飲料水を確保できる規模に相当する。また、得られたエタノールの大部分は地域外へ輸送され消費されることになる。原子力とバイオマス産業が併存する様子を Fig. 11 に示す。

Fig. 11 Future integrated Biomass Industry model using nuclear energy

経済性評価は今後の課題であるが、パッケージリアクタの熱エネルギーをバイオマスプラントへ適用することは、発生エネルギー規模的に十分可能性があると考えられる。

VII. まとめ

小型・独立型エネルギー供給システムとして、超小型自然循環型軽水炉、「パッケージリアクタ」を開発した。設備をトラックで輸送可能な単位でパッケージ化することにより運搬および据付性を向上させ、燃料を内包した圧力管をカセットとしてモジュール化することで燃料交換などのメンテナンス性を向上させた。また、高压化で作動する動的機器を排除し、自然循環で十分な余裕をもって除熱可能な出力密度に抑制することで安全性を高めた。さらに運転時の制御棒による反応度制御を不要とすることで通常運転時では運転員を不要とした。これらの機器およびシステムの簡素化により建設コストの低減を図った。

また、パッケージリアクタのターゲット市場である離島あるいはインフラ未整備地域のエネルギー源に対する要求に燃料の輸送・貯蔵コストの低減がある。原子力エネルギーは発生エネルギー当りの燃料体積・重量が化石燃料よりはるかに小さく、備蓄性に優れた特徴を持っている。また、温暖化ガスをほとんど放出しない特徴も持っている。このような原子力エネルギーの特徴はパッケージリアクタがターゲットとする市場ニーズに合致すると考える。したがって、パッケージリアクタはこれらの地域のエネルギー

源として、また、エネルギー小規模需要地からの地球温暖化防止の観点からも、最良の選択肢の一つになり得ることが期待できる。

— 参考文献 —

- 1) 瀧本洋樹, 日比宏基, 大山 健, 他, “パッケージリアクタの開発(3); 地域独立型エネルギー供給用超小型炉の開発概要,” 日本原子力学会「2004春の年会」要旨集, O35, (2004).
- 2) 守屋公三明, 松浦正義, 茶木雅夫, 他, “パッケージリアクタの開発(4); エネルギー発生系の概念設計,” 日本原子力学会「2004春の年会」要旨集, O36, (2004).
- 3) 松浦正義, 守屋公三明, 茶木雅夫, 他, “パッケージリアクタの開発(5); エネルギー転換系の概念設計,” 日本原子力学会「2004春の年会」要旨集, O37, (2004).
- 4) 日比宏基, 瀧本洋樹, 大山 健, 他, “パッケージリアクタの開発(6); 格納容器内システムの設計と設置手順,” 日本原子力学会「2004春の年会」要旨集, O38, (2004).
- 5) 日比宏基, 瀧本洋樹, 守屋公三明, 他, “パッケージリアクタの開発(7); 超小型炉による新たな原子力エネルギー市場の開拓,” 日本原子力学会「2005春の年会」要旨集, F47, (2005).
- 6) 茶木雅夫, 日野哲士, 松浦正義, 他, “パッケージリアクタの開発(9); エネルギー発生系の核設計高度化,” 日本原子力学会「2005春の年会」要旨集, F49, (2005).
- 7) K. Hibi, H. Takimoto, M. Chaki, *et al.*, “Development of the Package-Reactor(1),” *Prog. Nucl. Energy*, 47[1-4], 115-122 (2005).
- 8) T. Hino, M. Chaki, M. Matsuura, *et al.*, “Development of the

- Package-Reactor(2)," *Prog. Nucl. Energy*, **47**[1-4], 123-130 (2005).
- 9) 雨夜隆之, 沼田 守, 守屋公三明, 他, "パッケージシリアクタの開発(8); 資源リファイニングプラントへの適用," 日本原子力学会「2005春の年会」要旨集, F48, (2005).
- 10) K. Okumura, T. Mori, M. Nakagawa, K. Kaneko, "Validation of a continuous-energy Monte Carlo burn-up code MVP-BURN and its application to analysis of post irradiation experiment," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**, 128 (2000).
-