B101 熱供給用超小型原子炉に関する研究開発

Research and Development on Very Small Reactor for Heat Supply

○準 中島伸也 (原研) 正 楠 剛 (原研)
準 小田野直光 (原研) 正 落合政昭 (原研)

Nobuya NAKAJIMA, Tsuyoshi KUSUNOKI

Naoteru ODANO, Masa-aki OCHIAI

Japan Atomic Energy Research Institute, Toukai-mura, Naka-gun, Ibaragi-ken

In next century, a great deal of energy is used for public life in this country. This paper describes two new very small reactors for thermal heat supply to public use, such as air-conditioning and hot water. These reactors are characterized by the high safety, the long life fuel and the excellent cost performance. The reactor is an integrated and natural circulated PWR with passive safety systems. The reactor is designed with simple structure and enough isolation efficiency to be installed in the deep underground or settled on the base floor of a office building in a large city.

Key Words: Very Small Reactor, Integrated Type, Natural Circulation Type, Self-pressurization, In-vessel type CRDM, Heat Supply, Long Fuel Life, Passive Safety Reactor, MR-100G, MR-1G

1. はじめに

21世紀のエネルギーを考える際、エネルギー消費量の予測だけでなく、社会構造、地球環境、地政学的、自然災害、エネルギー資源等に関連して社会受容性を考慮した検討が必要である。

エネルギー消費量については、現在、産業用が減少の、民生用が増加の傾向を示しており、この傾向は将来も続くと考えられ、また民生用の業務用及び家庭用エネルギーの過半は、暖房用及び給湯用として、続いて電灯・動力用が占めている¹⁾。そのため、冷房、暖房、給湯用エネルギー源の整備が必要である。

社会構造に関しては、人口の減少、少子高齢化社会が確実視され、老後の快適な生活を達成するため、高温多湿、寒冷等四季に応じた空調のエネルギー確保は不可欠である。さらに、地域の自立化として、エネルギー大消費地域が供給面でも自立するため経済性、効率のよい小型・軽量化された地域エネルギー供給システムが必要となる。

地球環境に関しては、地球温暖化、オゾン層破壊等の対策として、それらの効果ガス排出量の国際的な規制が進められ、例えば、炭酸ガスあるいはフロンガスがその対象となっている²⁾。しかし、代替フロンもその対象となることから、快適な生活に不可欠な空調用冷媒が大きな制限を受け、将来的には電気式空調システムの代案を用意する必要がある。

地政学、自然災害については、我が国がエネルギー資源に乏しく、さらに島国でもあることから、天然ガス等のエネルギー輸入においても大きな制約を伴っている。一方、地震国でもあることから、地震災害、特に大規模火災の発生は、国民生活への多大な人的・資産的影響が大きく、そ

の懸念は都市住民に強いといわれている。そのため、地震防災に強い、裸火を用いないエネルギー様式を用いた生活環境の整備も重要であり、この対応策はまた高齢化社会における不慮の事故防止にも役立つ利点を有する。

原子力エネルギー利用拡充の観点から、21世紀の社会を支えるに必要な民生用エネルギー源としては、安価、長期安定性が高い、社会受容性が優れている等が大きな要素であり、その条件を満たすエネルギー源として原子力利用がその一つに考えられる。それは、少量の燃料で膨大なエネルギーを出す原子力の特長を生かし、冷房、暖房、給湯用の熱源として長期利用することであり、都会などのエネルギー消費地に分散して配置する小型軽水炉を中核とした地域熱供給システムを構築することである。

2. 熱供給用原子炉システム

(1) 超小型原子炉の要件

21世紀の民生用の吸収式冷凍機、暖房、給湯用エネルギー源としての熱供給原子炉規模としては、地域熱供給用の場合には、300～500 MWt h程度であり、年間を通しての熱負荷あるいは燃料交換等の効率を考慮すれば、一基当たりの熱出力100 MWt h程度、2次系の出口温度が200℃程度の超小型に分類される原子炉³⁾を複数台で供給できる。また地域熱供給用システムを補完する役割として、オフィスビル等での単独の熱供給を考慮すれば、その熱出力は約1 MWt hの炉で十分である。熱の有効な供給範囲は数kmが限度とされ、原子炉設置用の空間確保が重要であり、利用者との距離が近いこと、周辺の人口密度が多いこと等が予想される。そのため、事故発生の可能性を排除し、万が一の事故発生時においても、周辺住民の

日本機械学会〔No00-11〕第7回動力・エネルギー技術シンポジウム2000講演論文集〔2000-10-31, 11-1, 東京〕

10
月
31
日
(火)

避難を必要としない設計が要求される。また建設、保守管理に関しても、周辺住民の日常生活に極力影響を及ぼさない配慮も重要であり、現地での作業時間を短縮するための工夫が要求される。このような条件を考慮して、地域熱供給用としては大深度地下を、オフィスビルの熱供給用としてはビルの地下室を炉設置場所として想定する。

以上のように熱供給原子炉の要件をまとめると、

- ①限りなく受動的安全性が高いこと。
- ②小型・軽量で、現地作業時間が短いこと。
- ③長期連続運転が可能で、保守管理が容易であること。
- ④耐震性、耐火性等自然災害に対して優れていること。
- ⑤有効な隔離距離を確保する仕組みがあること。
- ⑥便利であり、安価であり、社会受容性が高いこと。

等が挙げられ、発電用原子炉とは異なった特性も要求される。

(2) 熱供給原子炉の共通する概念

熱供給用超小型原子炉への要件を満たす設計方策として、

- ①一次系は自然循環方式とする。
- ②原子炉は蒸気発生器及び制御棒駆動装置を内装する一体型とする。
- ③自己加圧方式を採用する。
- ④ボロンによる反応度制御を行わない。
- ④設置場所の地盤あるいはビルの条件に制限が少ない。

等を原子炉構築の基本概念とした。

自然循環方式の採用は、動的機器である強制循環ポンプが必要なく、ポンプに起因する故障を排除でき、長期連続運転が容易になるばかりでなく、点検保守等現場作業の簡素化が期待される。一体型の採用は、原子炉容器を貫通する一次系配管が不要となり、大口径配管破断事故の想定が不必要となる。また、原子炉容器胴部を貫通する配管がなくなり、原子炉の信頼性が飛躍的に改善される。自己加圧方式の採用は、加圧器が不要となり設置空間を小さくでき、空間確保が容易になる。さらに、ボロンを使用しないこと、一次系配管が無いこと、動的機器が無いこと等から不純物の発生量が極めて少なくすることが可能となり運転中の冷却水管理が不必要となり、運転保守面での大幅な改善が期待される。さらに、地質、ビルの構造・強度に依存する要素が少ないことを前提とし、熱供給用超小型原子炉の利用範囲の拡大を図っている。

3. 地域熱供給用超小型原子炉 (MR-100G)

MR-100Gは、熱消費地域の大深度地下に設置し、地上への熱供給をおこなう。大深度としては、地下約50から100mが想定されており、耐震性にも優れ、地上の生活空間と隔離でき、万が一の事故時においても放射能閉じ込めへの期待が大きい。また、新たな大深度地下の公共的使用に関する特別措置法⁴⁾により、優遇措置も期待され、地

下空間を低価で利用できる等の利点を有している。しかし、一般的に、我が国における大都市は河川流域の堆積層に展開されており、地質的に安定な固結岩盤を得るためには、1 km以上の掘削が必要であるとされていることから、未結地盤での建設が不可欠となる。また、新規の都市開発を除けば、地盤を選択する余地も少ないと予想されるため、既設都市の軟弱な地盤での設置も可能とする設計が要求される。

熱供給用原子炉の構築物としては、地下数10mに原子炉本体を設置する主空洞、水・空気浄化装置、使用済み燃料保管用施設、蓄圧水槽内水の一時保管用タンク等を設置する補助空洞及び冷房用の吸収式冷凍機、暖房あるいは給湯用の熱交換器、冷熱・温熱用の貯蔵庫等を設置するサービス空洞、それらを連結する配管系、通路等のトンネルで構成される。

主空洞は、原子炉数に応じた空洞数を必要とし、地盤との境界部は防水策を施した鉄筋コンクリート構造とし、地下水に起因する空洞の経年劣化対策を施す。主空洞の寸法は高さ約35m、直径約25mを想定し、内面にステンレス製のライナーを設けるとともに、機器搬入口の寸法は出来る限り制限し、気密性が高い設計とする (Fig. 1 参照)。また、原子炉の長期連続運転を想定していることから、個々の主空洞にはポーラクレーンを設置せず、他の主空洞と共用の移動式フレームを採用する。地下空洞部への建設時の機器搬入については、地下空洞周辺の自動車専用道路あるいは縦坑を利用する。そのため、熱供給システムの中で最大径を有する機器である格納容器寸法が制限されることとなる。補助空洞は、複数の主空洞に対して共用化を図ることにより、システム全体の小型化が図られている。

格納容器は、全高約22.5m、最大外径約8.5mの円筒形であり、上部に高さ約6.7mの非常時崩壊熱除去用蓄圧水槽を含んでいる。通常運転時には、原子炉容器と格納容器の間は真空が保持され、断熱性が保たれているが、非常時には真空が破られ、上部の蓄圧水槽から自重及び真空引力の自然力により水が落下し、崩壊熱が熱伝導により炉心から除去される。また、上部の蓄圧水槽は、主空洞への搬入時及び燃料交換時に取り外しができる構造とし、燃料交換時等には水槽内の水は補助空洞の内の水タンクに一次保管され、容器の小型化が図られている。さらに、非常時の冷却を補足する役割として、格納容器内の上部に配置している補助冷却装置があり、主空洞の内壁に円周状に配置する冷却水用水タンクにより動力装置を用いない自然循環方式で除熱する構造としている。なお、主空洞外の地盤温度は低温が期待されるため、金属冷却板等で放熱することも検討している。この冷却水タンクは燃料交換時には炉心槽、蒸気発生器、制御棒駆動機構等の遮蔽を兼ねた一時置き場として利用する設計となっている。

原子炉容器は高さ約12.2m、直径約4.3mで、内部に炉心、制御棒及び駆動装置、蒸気発生器を内装している。容器の上蓋は円盤状で、制御棒駆動装置の動力、位置計測及び温度計測用のケーブルが貫通する。フランジ部には蒸気発生器に接続する配管が貫通しており、容器胴部にはそれ以外の貫通部を有しない設計となっている。一次冷却水は自然循環により、直管式貫流型蒸気発生器の細管側を流れる構造である（Fig. 2 参照）。

炉心は高さ約1.5m、直径約1.4mで、燃料集合体37体で構成されている。燃料集合体は8年間の長寿命を想定し、原子炉の長期運転が図られ、燃料棒のピッチ13.9mm、17×17本の燃料棒で構成される。制御棒駆動機構は21体で、そのうち12体が停止用である。炉心の周りには反射体が設けられ中性子の有効利用を図るとともに、非常時にはこの反射体が自然落下するとともに反射体と一体化された中性子吸収体が降下し炉心を取囲み、減速材温度係数が負となることへの対処としている。なお、使用済み燃料は他の主空洞から出る燃料をまとめて補助空洞内の保管用プールで冷却される（Table 1 参照）。

運転保守管理としては、運転中の水浄化は行わず、運転終了後原子炉容器の蓋開放に先立って補助空洞内の水浄化あるいは気体浄化装置を用いて所定の濃度に達して後に原子炉容器の蓋を開放する。運転監視、保守は複数炉を一括しておこなう事とする。

4. オフィスビル熱供給用超小型原子炉（MR-1G）

MR-1Gは、エネルギーを集中的に使用すると考えられるオフィスビル等の地下最下室に原子炉を設置することを想定している。そのため、日常のオフィス作業に支障を生じないため、燃料交換等の現地での作業は概ね2、3日以内を目途に検討した。また、どのようなオフィスビルにも設置が可能となるよう、原子炉の設置に伴うビル自体に耐震性等の大幅な要求を必要としない原子炉であることも条件となる。そのため、燃料交換等を現地で行わず、原子炉内に使用済み燃料を入れたままの状態、地下室から搬出し、同時に、工場で新燃料を装荷した原子炉容器を地下室のピットに設置し、2次系の配管を接続後、運転が再開可能とする簡略化が図られている（Fig. 3 参照）。

原子炉は燃料を装荷した状態で工場と現地間を輸送することとなるため、一般道を通行することを想定する必要がある。そのため、現在の使用済み燃料輸送容器の大きさ、仕様を参考とし、格納容器を輸送用キャスクを兼ねる設計とした。

工場から現地間の原子炉の移動については、工場にて燃料の装荷、一次冷却水及び格納容器上部の蓄圧水槽に所定の水量を入れ、横置き状態でトレーラーにてビルの地下に輸送させる。現地では、地下室の原子炉ピットに設置し、

配管類の接続の後原子炉を運転する。所定の運転時間が経過する数年後において、原子炉停止後、格納容器上部の蓄圧水槽の水を原子炉容器と格納容器間の断熱用真空域に注入し、放熱しながらトレーラーにて工場へ輸送する。工場で使用済み燃料取出し後、洗浄、検査の後原子炉容器等は再度組み立て使用するものとする。万が一ビルの地下にて上部タンクの冷却水を落下させるような非常時の動作が入った場合には、上記と同様な処置により、トレーラーにより工場に輸送が行われる。なお、トレーラーによる輸送の際には、原子炉容器が横置きとなるため、それでも炉心が冠水し、さらに輸送中のいかなる姿勢においても炉心冠水が維持できるよう炉心の位置、原子炉容器の寸法、冷却水量を考慮した設計がなされている。

MR-1Gの原子炉、炉心、格納容器の基本的な動作原理はMR-100Gと同様の考えであり、出力規模に応じた寸法が異なっている⁵⁾。

格納容器は、高さ約5m、直径約2.4mの円筒状であり、上部約1.5mには蓄圧水槽が設置されている。また、この格納容器は現地と工場の間を輸送する際の輸送用キャスクを兼ねていることから、格納容器表面には鉛遮蔽体を巻き、その周りに放熱用フィンを兼ねた衝撃吸収材を設けるとともに、格納容器上部及び下部に衝撃吸収材を設けている。万が一輸送時に事故が発生した際の衝撃力を吸収でき、またその状態で地下室にて利用するため地震時の構造強度あるいは耐火性にも優れた設計となっている。これら原子炉容器、格納容器等の総重量は約100トンとなっており、トレーラーの輸送が可能な容積、重量となっている。

原子炉本体の構造は、高さ約2.8m、直径約1.3m、蒸気発生器はヘリカルコイル式貫流型である。炉心は、高さ約0.4m、直径約0.4mであり、4集合体で構成され、燃料ピッチは18mmである（Table 1 参照）。

運転保守管理としては、基本的に現地での運転保守は必要ない設計としている。

5. あとがき

民生用の冷房、暖房、給湯を中心とするエネルギー源として、超小型原子炉利用の有用性について述べ、社会受容性の高い原子炉としての要件をまとめ、その具体的な様式についてMR-100G及びその補完的原子炉としてのMR-1Gについて言及した。

熱供給用超小型原子炉は、いずれも自然循環方式、一体型とし、温度も233℃と比較的低温に設定している。このため、動機機器、原子炉容器の貫通配管の徹底的な削減、圧力の低減が図られることにより、自然力を利用した長期信頼性の高い原子炉システムの設計が可能となった。このため、原子炉の受動安全性は高くなると同時に、小型軽量化が図られ、コスト削減にも多大の効果が期待される。さ

らに、大深度地下利用に関する新法により、土地の取得、現地工事の短縮による工事全体の効率化が更に期待される。

今後、詳細な検討をさらに進める予定であるが、大きな技術的課題としては、長期信頼性が重要である内装型制御棒駆動装置の開発である。原研では数年来、船用小型原子炉MRX等の制御棒駆動装置として内装型の開発を進めており、現在ほぼ設計を終了し実証試験段階にあり、それをベースに開発を更に進める予定である。

参考文献

Table 1 Specification of Very Small Reactors

Design Name	MR-100G	MR-1G
Coolant System		
Outlet Temp. (°C)	233	233
Pressure (MPa)	3.0	3.0
Thermal Power (MW)	100	1
Containment Vessel		
Diameter (m)	8.5	2.4
Height (m)	22	5
No. of CRDMs	21	4
Fuel Life Time (years)	8	10
No. of Fuel Assemblies	37	4
Steam Generator Type	Straight-tube	Helical coil-tube

Common Specification

Reactor : Integrated Type

Cooling Mode : Natural Circulation Type

Pressurization : Self-pressurization Type

CRDM : In-vessel Type

Fig.2 MR-100G Reactor

- 1) 「エネルギー・経済統計要覧」 (1999年版)
- 2) 「気候変動に関する国際連合枠組み条約」
京都会議議定書 (1997)
- 3) "Design and development status of small and medium reactor systems 1995" IAEA-TECDOC-881(1996)
- 4) 「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」
(2000) 成立
- 5) 楠 剛 他: 「ビルの熱供給に適した超小型原子炉の概念設計」日本原子力学会誌 Vol.42、No. 11
(2000) 掲載予定

Fig.1 MR-100G installed in Deep Underground

Fig.3 MR-1G settled in Building