

JAERI-Tech
2005-057



JP0550521



社会受容性に優れた分散型小型炉システムの検討
一大深度地下を利用した地域熱供給小型炉システムー

2005年9月

中島 伸也・高橋 博樹・楠 剛・三友 信夫

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂
郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター
(〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなっ
ております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

社会受容性に優れた分散型小型炉システムの検討
一大深度地下を利用した地域熱供給小型炉システムー

日本原子力研究所東海研究所エネルギーシステム研究部
中島 伸也・高橋 博樹⁺¹・楠 剛⁺²・三友 信夫*

(2005年8月11日受理)

人口が集中した大都市での消費エネルギーの内訳は、冷房・暖房・給湯等が中心であり、それには比較的低質なエネルギーで供給が可能であり、これらの総合的な熱供給として、大深度地下を利用した地域熱供給システム小型炉システムの必要性を検討した。まず、世界の人口動態等を調査し、日本ばかりでなく今後著しい人口増加が予測される東アジアにおいて、人口の都市集中化が顕著となり、都市における民生用エネルギーの確保が重要な課題であることを示した。

また、社会受容性の観点から東京都の抱える都市環境、都市災害について調査をおこない、大都市の社会環境、社会構造的な課題と課題解決の方策として、分散型小型炉利用との接点を検討した。

次に、地域熱供給システムの熱源の規模を算定するために、人口10万人程度の職住接近した仮想都市モデルを設定し、そこで必要な熱量を算出し、さらに効率化を考慮した技術的検討を加え、熱出力100MWt (MR-100G) を2基設置することによりこの仮想都市の地域熱供給が可能であることを示した。また、その地域熱供給システムは約40年間の運転経過後においても、仮想都市にとってその規模は過不足なく有効に機能することもわかった。

さらに、原子炉の大きさを小型化する必要から、原子炉の大きさを検討し、最終的に大深度地下空洞の大きさを決定した。日本の大都市は河川の堆積地に開かれた場合が多く、その地盤は比較的軟弱であると想定されることから、100MWtの原子炉を設置できる地下空洞を建設することの可能性、地震時の挙動等について検討し、軟弱地盤における大型地下空洞の技術的成立性を確認した。

経済的な評価として、現在地域熱供給システムとして利用実績の大きいビルの地階に設置された天然ガスボイラーによるシステムとの経済性を比較し、長期運転の場合には、小型原子炉システムによる地域熱供給システムの方が優れていることを明らかにした。

大深度地下を利用する地域熱供給原子炉システムが導入される期待は高く、その実現のために不可欠な技術的課題あるいは社会受容性を定量的に表現するリスク解析についても言及した。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

* 独立行政法人 海上技術安全研究所から出向中

⁺¹大強度陽子加速器施設開発センター

⁺²研究炉部

Examination of a Distributed Small Reactor System with the Social Acceptability
-The District Heat Supply Small Reactor System Using Deep Underground Cave-

Nobuya NAKAJIMA, Hiroki TAKAHASHI⁺¹, Tuyoshi KUSUNOKI⁺²and Nobuo MITOMO*

Department of Nuclear Energy System
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura,Naka-gun,Ibaraki-ken

(Received August 11, 2005)

In the specification of the expenditure energy in a big city, air conditioning, heating, hot-water supply, etc. are major important targets and could be supplied with comparatively low quality energy. Availability using small reactor sited in deep underground cave was examined as a district heat supply system.

First, it was revealed that the reservation of the energy for public welfare in a big city became an important subject because the urbanization of population will be remarkable by the investigation of the movement of population in the world, not only in Japan but in East Asia where a huge population growth rate is predicted. From the viewpoint of a social acceptability, the contact points with a distributed small reactor system were examined to resolve a social structure subject of a big city through investigation of the city environmental issue and city calamity which Tokyo holds.

In order to estimate the scale of the heat source of a district heat supply system, a virtual city model was set up about 100,000 populations. The required heating capacity of the city was calculated and it became clear that the heat can be supplied by installing two reactors with thermal power 100MWt (MR-100G) in caves. Moreover, it turns out that the system will also function effectively for more than 40 years.

Since the big city in Japan exists in the deposition ground near river, it is assumed that the foundations strength is comparatively weak. We examined the possibility of constructing a large-sized underground cave in a weak ground and recognized that the technical issue about a cave behavior at a large earthquake, etc., can be solved.

* On loan from National Maritime Research Institute

⁺¹ Center for Proton Accelerator Facilities

⁺² Department of Research Reactor

The economic efficiency of this system was compared with the natural-gas boiler, and we confirmed that the district heat supply system by the small reactor is excellent especially for the case of long-term system operation.

Keywords: District Heat Supply System, Social Acceptability, Distributed Small Reactor System, Urbanization of Population, Natural Disaster, Deep Underground Cave, Quaternary deposit, Earthquake Resistance, MR-100G, Natural-circulation Reactor, Risk Evaluation.

This is a blank page.

目 次

1.はじめに	1
2.都市社会の状況分析と地域熱供給システムの現状	2
2.1 人口動態と都市化	2
2.1.1 世界の人口動態調査	2
2.1.2 日本の人口動態調査	4
2.2 都市のエネルギー消費の分析	5
2.3 我が国における地域熱供給システムの現状	6
2.4 海外における原子炉を利用した熱供給の例	7
2.4.1 スウェーデンの例	7
2.4.2 ノルウェーの例	8
3.需要地近接型の原子炉システムの検討	13
3.1 社会受容性	13
3.2 過度に都市化した社会	16
3.2.1 都市の環境問題	16
3.2.2 都市の自然災害問題	18
3.2.3 大地震に伴う人的被害想定	19
4.将来の仮想都市の想定	23
4.1 仮想都市での人口動態分析	23
4.2 仮想都市での消費エネルギーの検討	24
4.2.1 热需要量の分析	24
4.2.2 热供給量の日変化の分析	24
4.2.3 热供給量の年変化分析と熱供給システム効率の改善策の検討	25
5.社会受容性に優れた原子炉システムの提案	31
5.1 社会受容性を考慮したシステム性能の検討	31
5.2 原子炉システムの概念構築	31
5.3 大深度地下を利用した地下空洞方式による立地	32
5.3.1 空洞の工事工法の検討	33
5.3.2 空洞の安定性の検討	34
5.3.3 空洞の耐震性の検討	34
5.4 安全設計の検討	35
5.5 炉心設計の検討	36
5.6 原子炉構造の検討	37
5.6.1 原子炉容器	37
5.6.2 原子炉格納容器	38
6.経済性の検討	46
6.1 原子炉プラントを利用する場合の分析	46
6.1.1 原子炉プラントのコスト	46

6.1.2 大深度地下空洞のコスト	46
6.2 天然ガスボイラーを利用する場合の分析	47
6.3 プラントシステムのコスト比較	47
6.4 原子炉システムの運転保守向上のための検討	48
7. 実用化に向けた更なる検討課題	51
7.1 社会受容性の向上	51
7.2 地下水の利用	52
7.3 炉心の改良	52
8. あとがき	52
参考文献	53

Contents

1. Introduction	1
2. Analysis of Urban Society and Status of District Heat Supply System	2
2.1 Movement of Population and Urbanization	2
2.1.1 Movement of Population in World	2
2.1.2 Movement of Population of Japan	4
2.2 Analysis of City Energy Expenditure	5
2.3 Status of District Heat Supply System in Our Country	6
2.4 Example of Heat Supply System Using Reactor in Overseas	7
2.4.1 Example of Sweden	7
2.4.2 Example of Norway	8
3. Examination of Reactor System Sited Near City	13
3.1 Social Acceptability	13
3.2 Social Subject of Urbanized City	16
3.2.1 City Environmental Issue	16
3.2.2 City Natural Disaster	18
3.2.3 Human Damage Assumption Accompanied by Great Earthquake	19
4. Assumption of Virtual City of Future	23
4.1 Movement of Population Analysis of Virtual City	23
4.2 Examination of Expenditure Energy in Virtual City	24
4.2.1 Analysis of Heat Quantity Required	24
4.2.2 Analysis of Variation of Heat Quantity Supplied	24
4.2.3 Diversification Analysis of Heat Quantity Supplied of Every Year and Examination of Efficiency of Heat Supply System	25
5. Propose of Reactor System Excellent in Social Acceptability	31
5.1 Examination of System Performance with Social Acceptability	31
5.2 Concept of Reactor System	31
5.3 Cave Sited in Large Deep Underground	32
5.3.1 Examination of Construction Method of Cave	33
5.3.2 Examination of Stability of Cave	34
5.3.3 Examination of Cave Performance at Earthquake	34
5.4 Examination of Safety Design	35
5.5 Examination of Reactor Core Design	36
5.6 Examination of Reactor Configuration	37
5.6.1 Reactor Vessel	37
5.6.2 Containment Vessel	38
6. Economic Efficiency Evaluation of System	46

6.1 Analysis in Case of Using Reactor Plant	46
6.1.1 Cost of Reactor Plant	46
6.1.2 Cost of Large Deep Underground Cave	46
6.2 Analysis in Case of Using Natural Gas Boiler	47
6.3 Cost Comparison of Plant Systems	47
6.4 Examination of Update of Reactor System in Plant Maintenance	48
7. Further Subject towards Utilization	51
7.1 Update in Social Acceptability	51
7.2 Using Method of Ground Water	52
7.3 Improvement of Reactor Core	52
8. Postscript	52
References	53

1. はじめに

21世紀は都市の時代、地方の時代といわれ一極集中型の社会機構から多極分散型の社会機構に変化すべきであるとする多くの施策が進められている。このように我が国の社会機構が変化する中で、原子力に関しては、需要地から遠く離れた地方に原子力発電所が多数立地し、しかも発電設備は大型化してきた。そこで、将来の多極分散型社会の到来を期に、原子力の分散型としての利用形態があり得るかどうか、あればそのシステムの形態はどうか、そのシステムには実現の可能性があるかどうか等の検討を行うこととした。

我が国の原子力はエネルギー源として、特に発電用として利用されており、現在では原子力による発電規模は51基、総発電量は約45,000GWとなっている。しかし、発電以外の原子力エネルギー利用にはほとんど例がなく、原子力エネルギー利用分野の拡充の観点から、その可能性を含めた検討を行うことは、極めて今日的であると考えられる。原子力エネルギー利用の拡充のためには、消費エネルギー推計のみならず現在はもとより、中長期的な将来に向かっての社会状況の動向をも考慮してその社会的要求を概観し、その要求に呼応した原子力エネルギーシステムの検討を行う必要がある。

ここで提案する原子力を利用した地域熱供給システムが社会に受け入れられるためには、むしろ原子力の方が他のシステムより適合している、あるいは優れているとエンドユーザーである利用者（国民）側に考えられるような事項をも探求し、原子炉を利用することへの不安感や狭い枠内で経済性を論じた結果としてのデメリット等を越えた便利さが享受できる地域熱供給システムの構築が可能であるかどうかについて検討した。

21世紀のエネルギーを検討する際、エネルギー消費量が何によって支配されているのかを考えると、世界の経済市場、人口変動等が大きな因子となる。前者は、人為的な意向に基づくものであり、将来を予測しづらい側面を有しており、その方向への検討は重要ではあるが、不確定要素が多いため本報告での更なる言及は避けることとする。後者は、大規模な戦争による変動要因を除けば将来予測は比較的しやすいため、本報告では、人口動態に着目することとした。そこで、国連統計の数値を基に、我が国をはじめ先進国、開発途上国における人口動態の傾向を調査し、人口の増加傾向、人口のピークおよび人口の都市集中化に着目した。それは、先にも述べた我が国における多極分散型社会機構の施策が進んだときの人口動態を予測するためでもある。

過度に人口が集中し、あるいは将来集中すると思われる都市における土地の利用方法として、我が国では大深度地下利用がある。当該分散型小型炉システムの研究の緒に就いた頃、特別措置法が成立し、土地利用委員会で認知された地域の地下数十メートルより深い部分の公的目的の利用に際し、地上の土地所有権がほとんど放棄されることとなった。この制度の対象となる地域は別途委員会が構成され順次審議にされ決定されるが、すでに決定された地域を見ると大都市を中心となっている。このような、土地制度の大きな変換を考慮し、原子炉システムの設置場所としてこの大深度地下に着目することとした。大都市が存在する地域の地質は比較的軟弱な第四紀層の多い我が国の場合、大深度地下利用には課題もあり、そこに地下空洞を作る工法、耐震性等工学的な検討も重要である。

以上の検討とともに社会がそのような原子力システムを受け入れるかどうか、すなわち社会受容性についてその要因を分析することとし、原子力システム導入の阻害要因がどこまで改善され

るかの検討を試みた。その視点は導入により阻害要因に勝る利便性が得られるかであり、その検討として、過去の地震災害の被害状況、現在の過度に都市化した事による環境、構造的な弊害を調査した。

次に、導入すべきシステムの規模を試算し、最終的な大深度地下空洞の大きさを割り出すこととした。そのためには、地下空洞に設置すべき小型原子炉システムの容量を推定する必要があることから、将来の仮想都市として初期の人口を 10 万人と仮定し、現在の大都市、新興大規模団地等の人口構成、人口密度、エネルギー消費量の各種データベースを基にして数十年間の推移を予測することにより、導入システムの長期にわたる利用効率および経済性についての評価も試みることとした。

最後にシステムに必要な小型原子炉概念設計を行い、当該原子力システムのイメージを明確にするとともに、大深度地下利用の可能性を判断し、さらに今後検討すべき事項についても言及することとした。以下に検討結果の詳細について述べる。

2. 都市社会の状況分析と地域熱供給システムの現状

都市社会の状況を検討するため、世界の人口動態について調査し、人口の都市への集中が顕著となることから、都市のエネルギー消費量、我が国における地域熱供給システムの現状および海外における原子力による熱供給システムの現地調査について以下に述べる。

2. 1 人口動態と都市化

21世紀のエネルギーを考える時、その動向の大きな要因の一つとして人口動態が挙げられる。先進国はもとより、発展途上国においても、人口増加とともに人口の都市への集中化傾向は一層大きくなると予測され、「21世紀は都市の時代」ともいわれている。そのため、将来のエネルギー消費を検討する際に、都市におけるエネルギー問題は避けられない重要な課題の一つに挙げられる。そこで、都市の人口問題、それに伴うエネルギー消費量、その利用形態に着目するとともに、消費エネルギー源として原子力を導入することへの期待について検討することとし、日本および世界の人口動態に着目した調査を行った。

2. 1. 1 世界の人口動態調査

世界の人口動態とりわけ、人口統計調査については国連人口統計局のデータベース¹⁾がその代表である。この国連人口統計の報告書によれば、21世紀には、開発途上国を中心として人口の増大が予測され、さらに、都市への人口集中傾向が一層促進されるとまとめられているが、定量的な評価はなされていない。そこで、エネルギー消費量に関係の深い国のグループとして、先進 8 カ国（いわゆる G8 といわれる米国、仏国、英国、ロシア、独国、日本、カナダ、イタリア）と開発途上国の中で今後の開発が著しいと思われる東アジアの国々（中国、韓国、バングラデッシュ、インドネシア、ミャンマー、タイ、ベトナム、マレーシア、フィリピン）に着目することとし、先に述べた国連人口統計のデータベースから数値を抽出しグラフ化し、各国の人口動態の傾向をより定量的に把握することとした。

先進 8ヶ国の 1950 年から現在までの総人口推移と現在から 2030 年までの総人口予測をグラ

化して図1に示した。現在、人口の最も多い国は米国であり、過去、将来にわたり人口は単調に増加し続けるとされており、先進8ヶ国の中では特異な傾向を示している。人口が第2位であるロシアは、1990年頃にすでに総人口のピークを迎える、その後は人口が減少傾向に移り、将来においても減少傾向が続くと予測されている。人口が第3位の日本は、2007年頃に人口のピークを迎える、その後減少傾向に移ると予測されており、この傾向はピークの時期は異なるもののロシアの傾向に類似している。その他の先進国においては、人口の絶対値が少ないばかりでなく、変化的傾向も少なく、ほぼ横ばい傾向が見られるものの、ドイツ、イタリアも1970年頃に人口のピークを迎えていている。カナダは例外的に人口の単調増加を示しているが、絶対値はそれほど多くはないことが知られる。

この国連人口統計においては、各国の人口を農村人口と都市人口に2分してまとめている。その区分方法については同報告書からは知ることが出来ないが、例えば、「東京」としている人口は「東京都」の人口よりも多く、「横浜市」、「千葉市」等も含まれた数値に近い。また、関西地域では、「大阪」には、数値的には「神戸市」も含まれているが、「京都市」は含まれていない事等から判断すると、人口密度の高い連続した地域を一つのグループとして都市として分類しており、我が国の行政区画とは異なった取り扱いとなっている。さて、先進8カ国の都市人口の推移を見るために、国連人口統計のデータベースをグラフ化すると図2のようにまとめられる。ここで縦軸の都市集中率とは総人口に対する都市人口であり、ここでは50%を各国の都市集中化の一つの目安と考えて図中に一点鎖線で示した。都市集中率の高い英國の場合、統計初期の1950年ごろにはすでに都市集中率が80%を越えており、現在はほぼ横ばいの傾向であるが、2020年ごろには上昇傾向に転ずると予測され、2030年には90%を越えるとされている。次に都市集中率の高いドイツでも戦後の1950年頃は約70%程度であったが、その後単調に増加し2030年頃にはほぼ英國と同程度となると予測されている。他の先進8カ国の国々は1950年ごろまでに、ロシアを除いて都市集中率がほぼ50%を越え、現在では65~90%に達しており、今後もこの傾向が続き、2030年頃には70~90%までに増加すると予測されている。

両図から先進8カ国の人団動態の特徴として、米国を除けば総人口は横ばいあるいは減少傾向になると予測であり、一方、都市集中率に関しては今後とも増加すると予測されていることであり、先進国のはほとんどがいずれ90%に達すると想像されることから、後述する開発途上国もいざれはこの数字に近づくものと思われる。また、本論文の主題であるエネルギーの観点では、先進国での都市に偏重したエネルギー消費に留意することの必要性が示唆される。米国はむしろ例外的に総人口の急増が顕著であることから、米国のエネルギー消費に関しては他の先進国に比べより深刻であることが知られる。

開発途上国の中で、今後人口問題が顕著となる東アジア諸国の総人口の推移と将来予測をグラフ化し図3に示した。図中には国連人口統計において2030年に人口が3,000万人を越えると推計された9ヶ国（前述）を抽出したものであるが、中国に関しては、総人口が他の国々に比べ桁外れに大きいため、他の国と同じグラフに表示できないため、表示を割愛した。ちなみに、中国の2030年の人口は1,485百万人と推計されており、中国以外の国の中で最大の人口国であるインドネシアの5倍強である。中国以外の国では、インドネシアが単調に増加傾向を示し、ついでバングラデッシュの総人口が多い。その他の国々も単調に増加する傾向では同じであるが、増加

速度はインドネシア及びバングラデッシュよりは穏やかである。このことから、東アジアの人口増加に関しては中国、インドネシア及びバングラデッシュに着目することが重要である。

先進国の場合と同様にこれら東アジアの開発途上国の都市集中率の推移と予測をグラフ化して図4に示した。韓国は1975年頃に都市集中率50%を越えたのをはじめ、マレーシア、フィリピンが既に都市集中率50%を越えていることが知られる。さらに、将来、インドネシア、ミャンマー等の国々が都市集中率50%を越えると予測されている。人口増加が著しい中国は2030年に都市集中率が60%に達すると予測されている。開発途上国の特徴としては、先進国よりは半世紀程遅くはなるが同様な傾向を示しており、特に、中国、インドネシア及びバングラデッシュは総人口も多いことから、人口の都市集中化に伴う課題も山積することが予測される。先進国の都市集中率が90%近くになると予想されている事を考えると、中国もいずれ2050年以降のそれ程遠くない時期に都市集中率が90%に達することになる、そのときの総人口は15億人を遙かに超えると推定され、15億人近い人口が都市に居住することになり、本論文の主題であるエネルギー消費に関しては特段の関心を払う必要がある。

2. 1. 2 日本の人口動態調査

我が国に関する総人口、都市人口及び農村人口をグラフ化して図5に示す。総人口は2006年頃にピークを迎え、その後は徐々に減少すると予測され、いわゆる少子高齢化社会の到来である。農村人口は戦後急速に減少し、その後も単調に減少傾向を示している。一方、都市人口は今後やや上昇するも、2030年頃ピークに達すると予測されているが、総人口が減少に転じるため、都市化集中率は他の先進国と同様に増加する事となる。

日本を含め、先進8カ国及び東アジア、西アジア、ヨーロッパの開発途上国における人口の都市集中化傾向を図6にまとめた。横軸は各国における都市人口が農村人口を上回る、すなわち、都市集中率が50%に達したあるいは達すると予想される年であり、各国の人口データを基に50%ラインを求めたものである。縦軸は都市集中率が50%を超えた年の各国の総人口を示している。全体の傾向として右上がりのバンドであり、既に都市集中率が50%を越えている先進8カ国、ヨーロッパ等の場合には、比較的総人口が少ない場合が多いが、今後50%を越えると予測されている国々では総人口そのものが非常に多い特徴がある。

人口の問題は経済活動はじめエネルギー消費状況等に直接影響を与える因子であり、国連人口統計が示す2030年までの予測以降についても、さらなる国連人口統計の予測に関心が持たれる。この問題は当然のことながら出生率と関連しており、出生率はその国の国内総生産(GDP)とも関連が深く、我が国に限らず、国のGDPが上昇すると出生率が低下する傾向がある。つまり、国内総生産が大きくなるに従って出生率が低下することとなる。都市に人口が集中することは生産活動を集中化、活発化するためGDPは上昇すると考えられるが、人口の都市集中化が進めばいざれ出生率は低下し、総人口が抑制されることとなり、都市集中率はさらに上昇することとなり、このような段階を経ていざれ都市集中率が90%に達すると予測される。なお、米国の場合には、海外からの移民が人口の急増の起因であるとされることから、他の国々とは傾向を異にし、特異な人口動態を示しており、今後も人口の増加が著しいと推定される。

人口の増加は東アジアにおいて、西アジアではインド、パキスタンで顕著であり、2050年頃に向かって人口は都市部に集中化し、その割合は人口の80%にも及ぶことが明らかになった。今後これら都市部に集中した人口の消費エネルギーの確保は食料問題等と並んで人口問題の大きな課題の一つであり、アジアにおける問題は先進国のそれに比べ、人口の絶対数が大きいことから特に深刻であり、都市のエネルギー消費の課題解決は急務であるといえる。

2. 2 都市のエネルギー消費の分析

我が国の将来像はどのようにになっているか。それを推測するに参考となる例として、「21世紀の国土グランドデザイン」²⁾がある。これは、国土庁（現在の国土交通省）が1998年にまとめたもので、従来から国土庁が実施していた全国国土開発計画の第5次に当たるもので、この計画では21世紀を迎えることに言及していることから、特にこのようなキャッチフレーズを設けたものであるとしている。この国土計画によれば、現在の国土構造は経済面を中心とする欧米へのキャッチアップという20世紀の歴史的発展段階を色濃く反映したものであり、21世紀の文化的状況にふさわしい国土づくりを進めるためには、東京への一極集中へとつながった国土構造の流れを転換する必要性が背景と指摘されている。この国土計画の意義と役割として、時代の大転換あるいは阪神・淡路大震災に直面して、国民が国土や生活の将来に懸念を抱き、将来の方向付けが見えない状況の中で、国土開発の理念の変化を踏まえ、国土づくりの新しいビジョンを提示することであるとしている。ここでいう時代の大転換としては地球時代、人口減少時代、高齢化時代、高度情報化時代、社会構造の変化等を挙げている。この国土計画では、我が国の問題点と将来の予測に基づき、今後実施すべき事は20世紀の国土建設で生じた過度に一極集中した歪んだ社会を是正するため、自然豊かな、自然災害に強い都市を再建設することが強く打ち出されているとともに、一方で21世紀には少子高齢化時代が到来し、社会構造も3次産業を主体とする社会へ変化するであろうことが予測されている。後述する仮想的な都市の概念構築にはこのグランドデザインの構想を参考として検討を進めた。

21世紀を快適に生活するためにエネルギーは不可欠であり、特に人口が都市に集中した際に必要な消費エネルギー量あるいはその種類について検討するため、我が国のエネルギー・経済統計のデータベース³⁾を基にエネルギー部門別最終エネルギー消費の推移をグラフ化して図7に示した。ここで、部門別として、産業用エネルギー、民生用エネルギー及び運輸用エネルギーに分けてその推移を見ている。図より知られるように、産業用エネルギー使用量の増加率が減少し多少の増減はあるもののほぼ横ばいの傾向となっている。民生用および運輸用エネルギー消費量は漸増が続いているが、運輸用エネルギーは1999年頃にピークを迎えていているように見える。民生用エネルギーは業務部門と家庭部門で成り立っており、そのエネルギーの内訳は今後のエネルギー消費のどこに着眼するかを知る上で重要な課題である。

同図で2000年における我が国の民生用消費エネルギーの内訳のうち、業務部門は冷房、暖房、給湯で約52%となっている。また、家庭部門でも、冷房、暖房、給湯で58%を示しており、その他は動力・照明及び厨房であり、業務部門で48%、家庭部門で42%となっている。このことから、民生用エネルギーの50%強は冷房、暖房、給湯が占めることとなり、今後のエネルギー源を考える際に重要なヒントとなる。

一方、東京都の1998年度のデータによると、産業用、民生用、運輸用の比率は10:50:40となっており、全消費エネルギーの50%が民生用エネルギーである。先ほどの内訳の約50%以上が冷房、暖房、給湯であるとすると、東京のように過度に人口の都市集中が進んだ都市では、全消費エネルギーの25%以上が冷房、暖房、給湯で使われることとなる。

さらに、冷・暖房・給湯に対するエネルギー源の構成を見ると、電力が60%、都市ガスが32%、灯油が5%、LPGが3%となっており、照明等以外での電力使用の多いことが知られる。これら民生用エネルギー消費の中で冷房、暖房、給湯についてはその熱源は低質なエネルギーで供給可能であることから、電力のような高品質なエネルギー以外のエネルギー供給形態の可能性を検討することも重要となる。例えば、現在冷房に多く利用されている圧縮式冷凍機の動力は電気であり、さらにその冷媒は代替フロンガスがほとんどある。この代替フロンガス物質は地球温暖化促進物質であることから、1997年の地球温暖化防止に関する京都会議（COP3）において使用が制限されたため、新たな冷媒の模索が続けられている。そこで、在来の圧縮冷凍機に替わる冷房設備として吸収式冷凍機を考えると、それは約170°C程度の熱源を利用することにより達成でき、吸収式冷凍機はその設備効率を上げるために大型システムが望ましいことも知られており、新たな熱源の確保が容易であれば、豊富な冷房量を提供できる空調が可能であるばかりでなく、夏場の電力ピークに電力消費を軽減する効果も期待される。

2. 3 我が国における地域熱供給システムの現状

上述のように将来のエネルギー利用の中で、都市の冷房、暖房、給湯の熱源が重要なことが明らかになり、そのようなエネルギーの利用形態の理想像の一つとして地域熱供給システムを考えられる。我が国における地域熱供給システムの実情はシステムが表面的に見ることができないため、普段の生活では実感できない。地域熱供給会社の団体である日本熱供給事業協会の資料⁴⁾によれば、1998年には、熱供給事業者数は約80社、熱供給の供給区域数は約140箇所に及んでおり、供給区域数は近年増加の傾向が著しい。熱供給の利用としては、住宅利用が46,000件、業務利用が1,441件であり、これらの熱供給の床面積は約40,000千m²に及んでいる。地域熱供給協会の最新のデータによれば、供給区域数は150を越えているとの報告もある。その内訳と熱量の推移を図8に示す。1998年の段階で、冷熱が約12,000TJ、温熱が約8,000TJおよび給湯が約500TJとなっており、また、冷熱としての利用の増加が著しく、温熱の増加率は1995年以降低下し、給湯はほぼ横ばいの傾向を示していることがわかる。現在の熱供給システムの多くはオフィスビルが中心で、供給量の増加もオフィスビルによるものが多い。これら既存熱供給システムの熱源についてみてみると、都市ガスが14,000TJ、ついで、排熱、電気がほぼ3,000TJ、ついで石油、LPGとなり、一部石炭利用例も報告されている。一方、これらの熱供給システムの導入当初はバブル期でもあり、大量の廃棄物が生じ、その燃焼排熱利用も活発であったが、昨今その廃棄物も激減し、さらに低燃焼温度に伴うダイオキシン発生が社会問題化するに至ったこと、石油市場の並はずれた急騰等、地域熱供給にとって厳しい状況となっているが、インフラが整いつつある熱供給システム維持のためには熱源確保が重要な課題となっている。

東京都においては災害防止の観点から床面積が大きい業務用オフィス等における熱供給システム導入の奨励もあり、その方策は地方の拠点となる都市の再開発でも広く取り入れられる方向に

あることからマンション等の集合住宅への地域熱供給システム導入も拡大することが期待できる。そのような例として、最近開発された六本木ヒルズを挙げることができ、ホテル、マンション、オフィスビルに熱供給されている。

また、既存の熱供給システムの熱源を後述する小型原子炉によって供給する場合を推定すると、供給延べ床面積換算では約 30 基、供給熱量換算では 25 基の 100MWt クラスの原子炉に相当する。

2. 4 海外における原子炉を利用した熱供給の例

大都市において地域熱供給システムが拡大しており、今後も拡大するであろうとの予測について既に述べた。そこで、地域熱供給システムの熱源に原子炉を利用しているケースについて調査することとした。我が国では、原子力発電所の排熱を利用した養魚や温室の例があるがいずれもデモンストレーション的な域を出ていない。一方、海外ではロシア、スウェーデン、ノルウェー等で地域熱供給の熱源として原子炉を利用する実績⁵⁾を有しており、現在も稼働されているものがある。その例の中で著者が現地調査を行ったスウェーデンのオーガスタ原子炉とノルウェーのハルデン原子炉の概要について以下に述べる。

2. 4. 1 スウェーデンの例

スウェーデンの首都ストックホルムの郊外の町に 55MWt の熱供給と 10MWe の電力供給を行っていたオーガスタ炉があり、原子炉の熱出力は 80MWt で加圧重水型である。原子炉の設置場所と需要地の距離は約 3.2km であるが、途中に石油燃焼式のバックアップ基地を経由する供給ラインが敷設されている。この熱供給システムにおけるバックアップ基地の存在は、システムの規模、コスト等への影響が大きいため非常に興味深い。現地調査の際には後述する原子炉システムに特化していたことと、パイプラインが積雪で埋もれていた事により、詳しく調査することができなかつたが、原子炉の出力規模を比較的抑えることができ、需要地までの熱損失あるいは熱不足分をバックアップ基地で加熱することにより、全体の熱供給コストを下げる工夫がされていたのではないかと思われる。

原子炉本体は、片麻岩、花崗岩でできた丘に岩盤を掘削し約 30,000m³ のドーム状の空洞を作り、空洞内に 1 基が設置されていた。原子炉本体が設置されている空洞へは地上からトンネルでつながっている。原子炉の運転開始は 1964 年であり、現在は運転を終了し解体中であるが、原子炉本体の解体は行う予定がなく、使用済み燃料の搬出、空洞外部にある発電機の撤去等限られた工事を行って解体工事としては終了し、以後は空調等の監視を続けるとのことである。現地を調査した際には、空洞に地下水の湧水が多くその処理が大変であり、廃炉後もその処理は続くとの説明であった。この地下水は運転中からもその対策が重要で、地下水が空洞内にたまると、空洞とその内側に張られた鋼製ライナーの間に地下水が溜まり、炉室内への溢水につながるため常時排水が必要であるが、この水は放射性廃棄物の取り扱いになりその貯蔵施設の管理も重要なことであり、後述する大深度地下を利用する地域熱供給システム概念の検討に参考となつた。

2. 4. 2 ノルウェーの例

ノルウェーには首都オスロから南に下ったハルデンの町に、燃料照射試験等で現在も運転中のハルデン炉がある。この炉は熱出力が 26MWt の沸騰重水型であり、195°C、毎時 25トンの蒸気を隣接するパルプ工場に供給する熱供給炉でもある。原子炉は片麻岩質岩盤の丘に約 8,900 m³ の空洞を掘削し、空洞内に設置されている。この原子炉で興味あることは、原子炉の空洞を形成する岩盤でできた丘の上に民家が点在しており、炉心のほぼ真上に民家があることである。全体として小規模な職住近接の需要地近接原子炉システムの様相ともいえる。

現地調査の際、オーガスタ原子炉の例でも述べた地下水について同様の問題があり、空洞最下部では、床に地下水が溜まっていた。その量はオーガスタ炉程深刻であるとの説明はなかったが、コンクリート構築物の天井が湾曲している部分があるなど、岩盤の空洞とその中のコンクリート構築物の設計に工夫が必要なことが知られ、大深度地下を利用する原子炉システムの概念構築への参考となった。

(参考) フランスの空洞を利用した原子力発電の例

オーガスタ炉及びハルデン炉では、良質な岩盤の丘に空洞を掘削し、空洞内に設置した原子炉で熱供給するものであるが、岩盤に空洞を設け発電用原子炉を設置した例がフランスにあり、現地調査を行った。この炉はフランスとベルギーの国境に位置したショーア原子炉である。現在はショーブ及びCの最新の発電用大型原子炉が併設されているので、それと区別する意味でAの文字が付いている。大型炉は、通常の地上立地であり、横を流れるミューズ川を冷却に利用している。

ショーア炉は発電専用のPWR原子炉であり、現在は運転を終了している。国境にほとんど接しているが、発電した電力利用をフランスとベルギーで折半しているとの説明で納得した。気になる地下水であるが、ここではオーガスタ炉と同程度の深刻さがあり、特にミューズ川の水位と勾配が緩やかであるため、大量の地下水を一度に放出できないシーズンがあり、溢水による排水の管理が大変であるとの説明を受けた。

以上、海外での熱供給用原子炉等の現地調査した概要を紹介した。また、発電用原子炉の例も含め空洞内に原子炉を設置する事自体よりは、地下水の問題のように保守管理面での問題が大きいことが明らかになった。

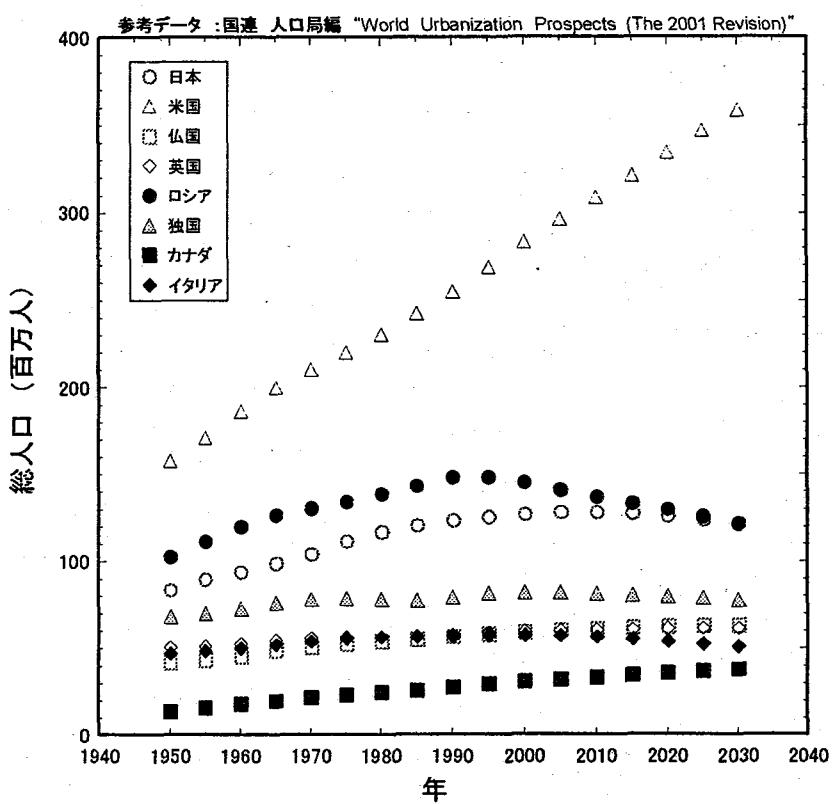


図1 先進8ヶ国における総人口の推移と予測

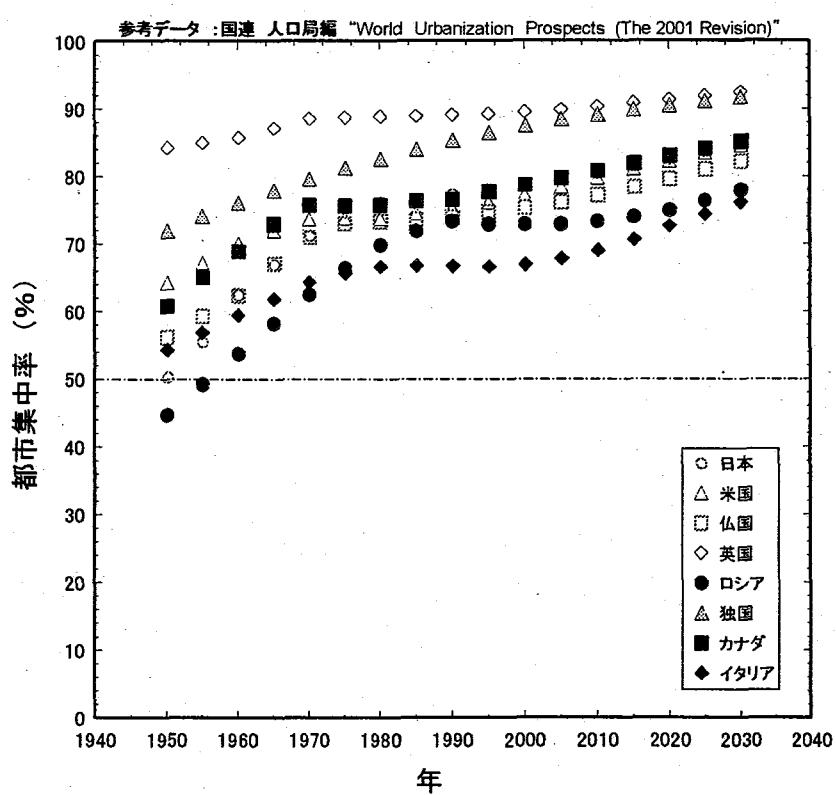
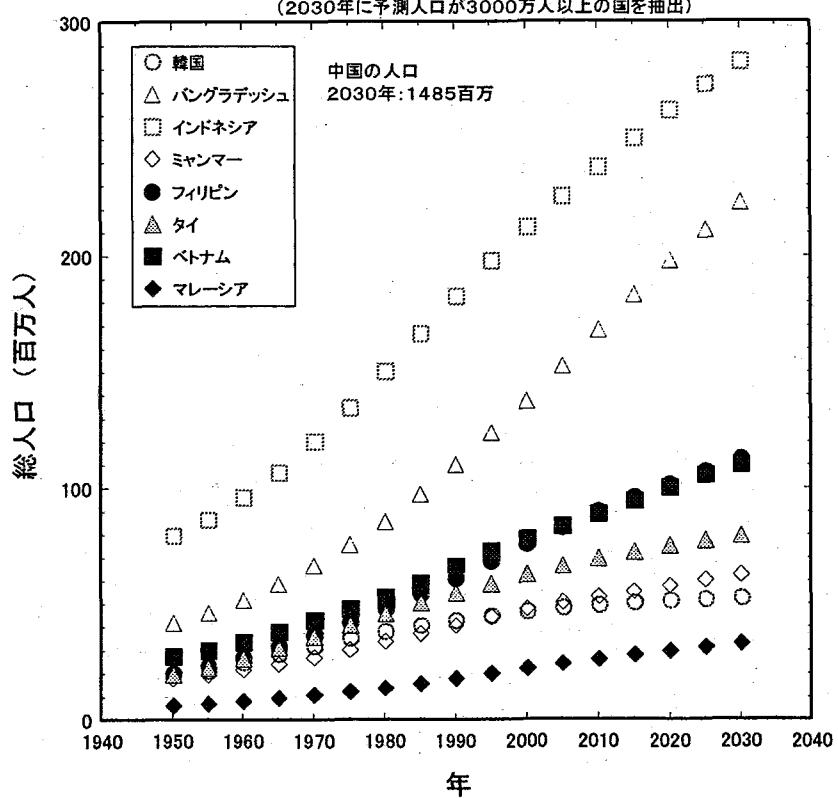
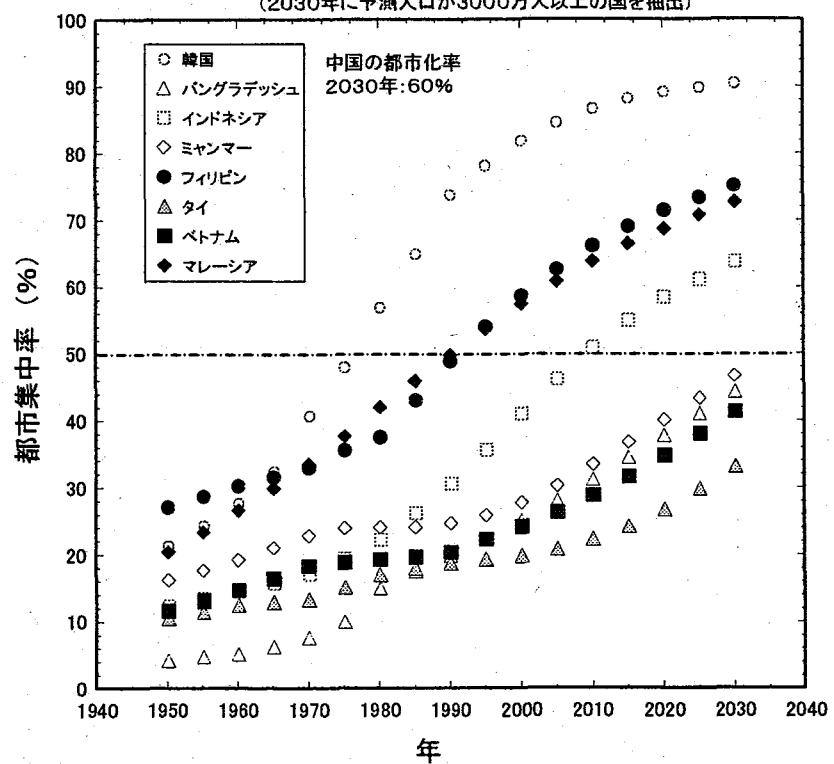


図2 先進8ヶ国における人口の都市集中率の推移と予測

参考データ：国連 人口局編 “World Urbanization Prospects (The 2001 Revision)”
 (2030年に予測人口が3000万人以上の国を抽出)



参考データ：国連 人口局編 “World Urbanization Prospects (The 2001 Revision)”
 (2030年に予測人口が3000万人以上の国を抽出)



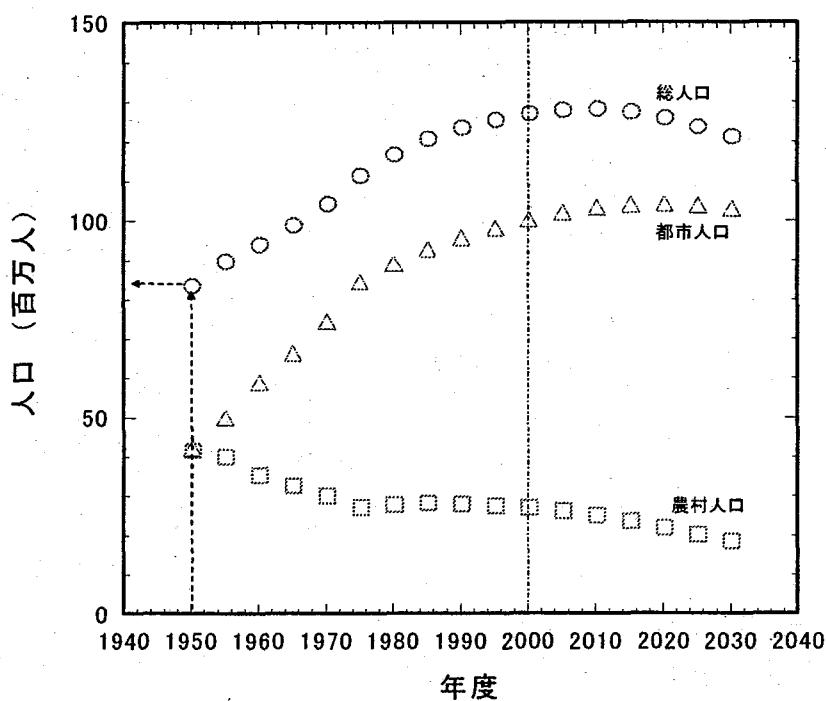


図5 日本における総人口、都市人口、農村人口の推移と予測

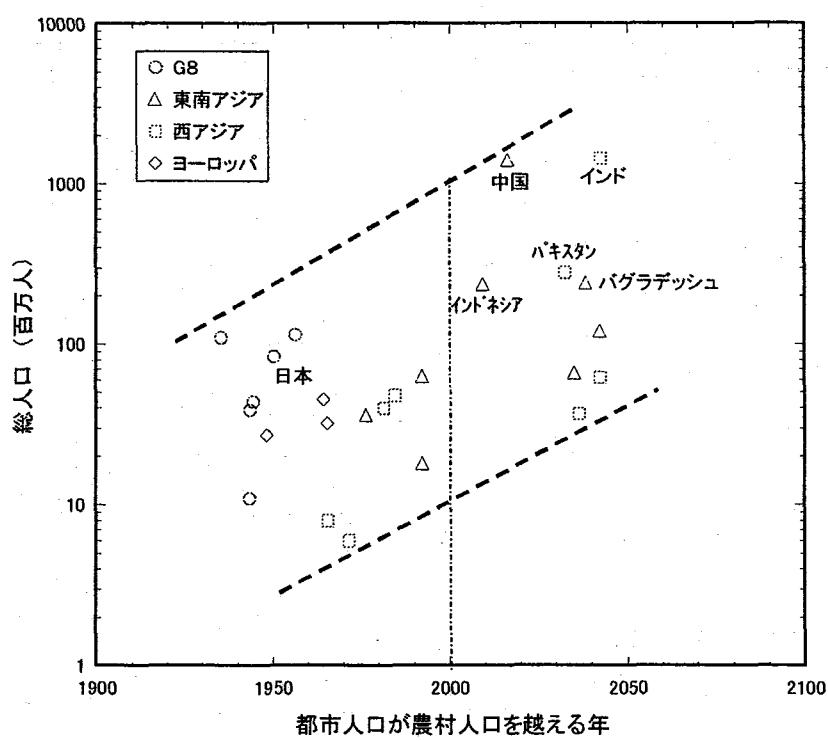
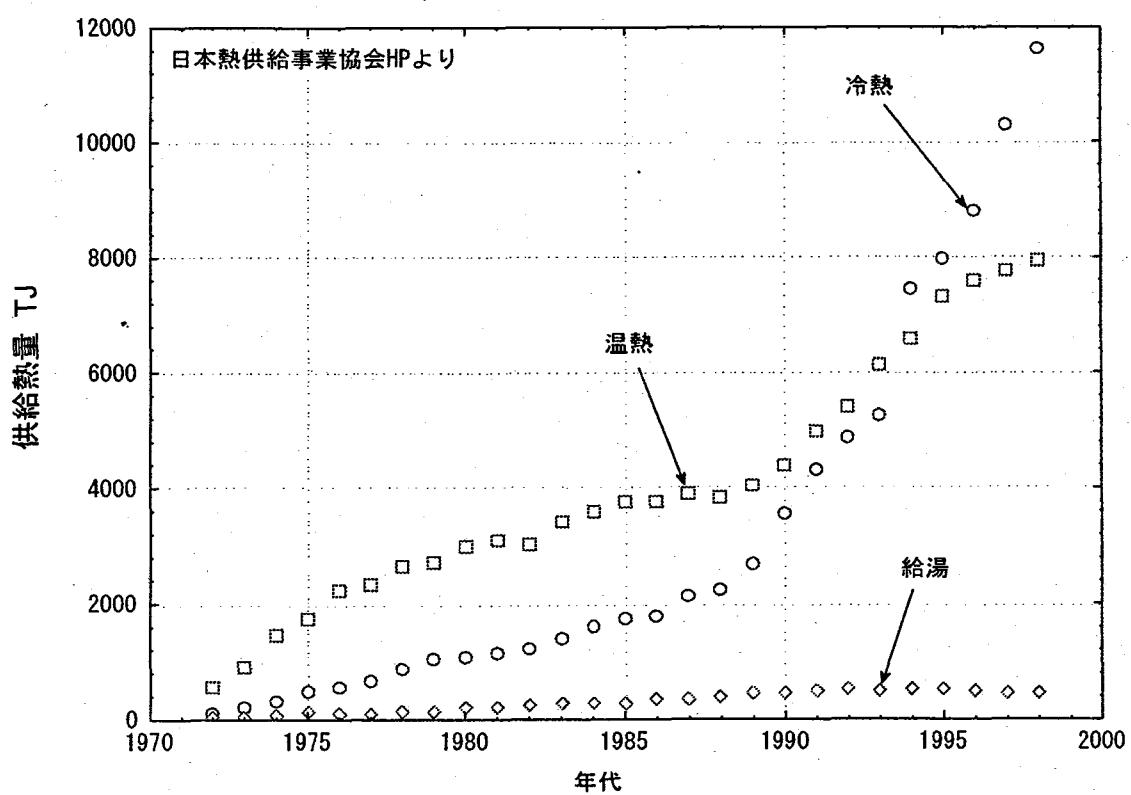
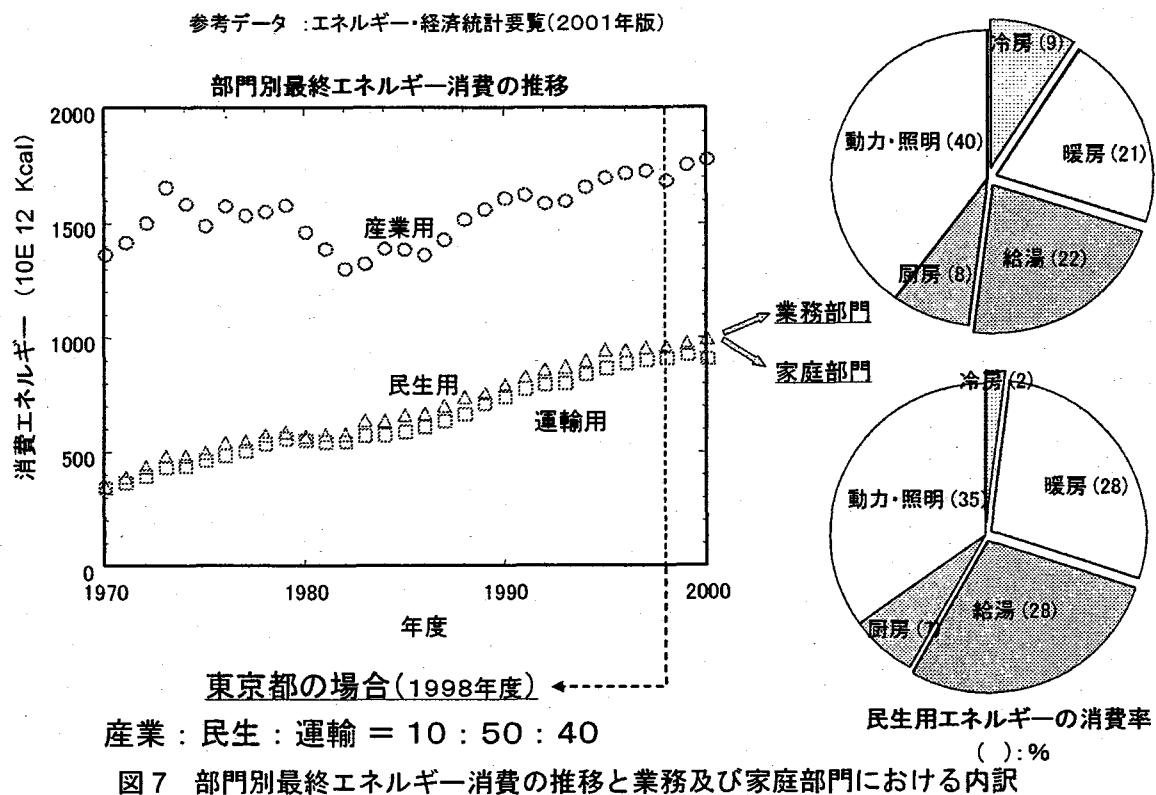


図6 世界の人口と都市集中と総人口の関係



3. 需要地近接型の原子炉システムの検討

我が国をはじめ先進国では人口は都市に集中する傾向を示し、その割合は総人口の約80～90%にも達すると推測した。一方、発展途上国では今後人口の増加ばかりでなく、先進国並みの都市への人口集中が予測されていることを示した。また、人口の集中化した都市では、第三次産業を中心とするいわゆる民生用エネルギー消費が顕著となり、さらに、暖房あるいは冷房等の空調、給湯用の消費エネルギーが全消費エネルギーの多数を占めること、我が国では大都市を中心として地域熱供給システムの設置が急速に進んでいることも分かった。

現在の地域熱供給システムの熱源としては、天然ガス、重油、廃棄物等を燃焼させる方式がほとんどであるが、熱源として原子力を利用する方式について我が国ではその例を見ないが、2章で述べたように外国ではいくつかの例があり、現在も利用されている。

分散型小型炉システムとしては、発電用、熱供給用あるいは熱電併給炉等の利用が考えられる。発電用原子炉は既存の大型炉のように電力ネットワークの上流部に位置し、さらにその発電量も火力発電量、水力発電量とのバランスを図ることにより、個々の電力会社によりネットワーク管理が良好なシステム構成により維持されている。そのようなネットワークを管理する電力会社が分散型小型炉を人口が密集する大都市に立地することは得策とはいはず、可能性としてはほとんどない。もし、需要地近接の発電用原子炉があるとすれば、電力自由化における新規参入業者の場合であるが、電力自由化の技術的課題でも大きな問題となる樹形電力網の下流部に大容量の発電設備を参入させることによる電力ネットワーク管理上の諸問題があり、なおかつ、外部電源の確保等原子力発電にかかわる問題も加味されて、技術的問題が一層複雑になり、新規参入の小規模企業が原子力を取り扱うことの大変さも考慮すると、その可能性は極めて少ないと考えられる。

一方、需要地として離島を挙げ、小規模発電を模索する意見もあるが、我が国の場合、沖縄は離島に関する法律⁶⁾により、本島に位置づけられており、すでに、火力による送電ネットワークができており、状況としては本州の場合に近い。その他の離島を調べると住民が5千人以上で、架橋が困難と思われる島を調べると、奄美大島、石垣島、徳之島、沖永良部島、喜界島、与論島、伊良部島、宮古島、八丈島、壱岐島、対馬島、屋久島、久米島、福江島、佐渡島、種子島、中通島、後島、利尻島の20島が候補として挙げられるが、このなかで島自体が噴火によって形成されているような例が多く、火山島に原子炉システムを設置することは考えにくいため、原子炉が設置可能となる島はきわめて少なく、石垣島程度と推定される。

以上断片的ではあるが、需要地近接型の原子力システムを推考する時、いろいろな選択肢の中で大都市の地域熱供給システムの熱源として利用することが最適であると結論した。そこで、我が国で地域熱供給システムに原子力を利用することについての可能性の検討として社会受容性の観点からの検討を試みた。以下に社会受容性に対する考え方及び現在の大都市が抱える社会問題を調査し、可能性の接点を検討することとする。

3. 1 社会受容性

社会受容性については、広辞苑などには見つからないので定義そのものは定かでないが、ここでは、提案する原子力システムが社会に受け入れられることと解釈する。一方、原子力の社会受

容性に関連しては日本原子力学会でも「外部性」を評価する試みが始まっている⁷⁾。この「外部性」はミクロ経済学の中で取り扱われる経済分野での用語であり、その外部効果は市場経済をベースに経済主体の活動が市場を介さずに他の経済主体に影響を及ぼすこととされている。外部効果としては、金銭的外部効果、技術的外部効果等があり、その影響として外部非経済と外部経済があり、前者は主体の経済活動により好ましくない影響が生じる場合であり、後者は好ましい影響が生じる場合である。原子力の場合、前者としては放射性廃棄物の長期処分、事故時の対応の困難さ等が想定される。後者としては非燃焼燃料等の理由により、地球温暖化の低減、原油価格の高騰防止等がその例に当たると思われる。いづれにしても、原子力の「外部性」評価は正しいは負の影響度を「お金」により定量的に評価しようとするもので、単に原子力システム導入の正の部分だけでなく、負の部分を定量的に評価しようとする方向は原子力の社会受容性の検討にとって重要となるが、ここでは、その前段階としてシステム導入時での社会受容性に関わる事項について検討することとした。

原子力を利用した地域熱供給システムの導入を前提とする社会受容性について検討する際に、自動車の多利用社会到来の経緯を参考にすることができる。モータリゼーションの特徴として、

- ①自動車事故による死亡数は年間1万人を越えており、負傷者数は計り知れない。
- ②自動車は、住宅に次ぐ高価なものであり、維持費としてのガソリン代、保険代、駐車場費用も無視できない。
- ③一般家庭で唯一使用するに免許証が必要であり、年齢制限もあり、その取得に多大な時間と経費が必要である。
- ④道路交通法等により極めて詳細な法規制が施され、事故に至らない段階で、スピード違反、駐車違反等々の多大なルールが強いられている。
- ⑤高速道路料金はある種の通行税であり、ガソリン税等を含めると自動車使用に伴う納税料は多重かつ多大である。
- ⑥自動車は便利であり、個人の生活空間を拡大し、長距離通勤を可能とし、通勤時間の短縮が容易である。
- ⑦毎年、自動車メーカーは新しいモデルを発表し、ユーザーは相当の頻度で新車に買い換えている。
- ⑧老若男女を問わず、自動車による便利さについては議論を待たない。
- ⑨超高級車、高級車、大衆車、スポーツカー等段階的なグレードと広い車種により、ステータス性も満足でき、購入意識を高揚させる条件が整っている。
- ⑩自動車社会の道路、橋、専用道路等のインフラが拡充し、今後も継続する。
- ⑪排ガスによる大気汚染と健康被害（騒音問題も同じ）が社会問題化している。

等列挙につきることがない。これらの自動車社会の特徴の中身を考えると、次の4要因に分類することができる。

I. 利便性 [例えば、特徴④、⑥、⑦、⑩ 等]

- II. 経済性 [例えば、特徴②、③、⑤ 等]
- III. ステータス性 [例えば、特徴⑧、⑨ 等]
- IV. 不安全感 [例えば、特徴①、④、⑪ 等]

自動車が現在のように発展した背景にはやはり利便性が大きいと思われる。導入による利便性に経済性あるいは不安全感があったとしてもそれを越える優位性があれば社会受容性は確保され、さらに、ステータス性があることにより、導入への先駆的な役割が確保され、徐々に利便性の認識が広がることにより、システムへの社会受容性は底辺を広げ、より確かなものとなると考えられる。

次に原子力を利用した地域熱供給システムに対して、自動車社会の要因分析で結論した4要因を検討することにより、地域熱供給用原子力システムの社会受容性を検討する。

○利便性としての視点

→生活時間の合理化

利用の即効性、保守管理の時間的な節約（いつでも、すぐに使える）

→生活空間の合理化

室内機器の量的・外観的な軽減、燃料補給等の煩わしさがなくなる

→エネルギーの有効利用

終日運転利用、カスケード利用等による廃熱量の低減

→自然災害への備え

地震災害と大規模火災の重畳被害の低減

→自然空間の合理化

地下利用により地上空き地の増加、緑地、遊歩道等の確保が容易

○経済性としての視点

→手軽なシステム利用の可能性

建設コスト、手続き・利用方法の容易さ

→安い運転経費の可能性

保守、管理の容易さ、長期安定・安価な燃料と利用

○ステータス性としての視点

→最新的な生活の享受

欧米的な生活様式の甘受

→環境バリアフリーによる快適な生活

居住空間全域を空調する事により高齢化社会での快適な生活の保証

→地球・都市環境解決への貢献感

炭酸ガス、HFC 等排出規制物質の低減

○不安感としての視点

→システムの信頼性

運転トラブルによる長期・短期の利用停止及びその懸念

→大事故の回避

健康への影響、生命・財産の損失への心配

→地下空洞利用による安心感

施設が視界から無くなる

→都市のヒートアイランド化を回避

個別利用の弊害を回避可能

等が挙げられる。

以上で述べたシステム導入における社会受容性に関する視点に対して次節より、現在の都市あるいは将来の都市において既に問題となっている幾つかの都市問題の具体例について述べる。

なお、ここで、原子力発電などしばしば経済性が全てに優先するとする考えが見受けられ、原子力発電のその点での劣勢に関して、その意見は原子力以外の火力発電、水力発電等を発電源とする電力ネットワークが完備されているという条件があり、発電源の費用がシステム選択の最も重要な要因になるとするいわば狭い経済性評価に基づくものと考える。今後、原子力利用に対する原油の価格安定、長期供給安定あるいは以下に述べる都市の環境問題、社会構造問題等いわゆる「外部性」の正の経済性を定量的に評価できるようになれば必ずしも同じ意見となるかどうかは不明である。

3. 2 過度に都市化した社会

3. 2. 1 都市の環境問題

21世紀は都市の時代、すなわち国民の多くが都市に居住し、生活の大部分を都市で過ごす時代となり、人口の都市集中に伴う種々の問題も生じてくるとされ、今後どのような都市問題が生じるかを考える際に、既に大規模な都市集中が進んでいる東京都について見てみると、環境に関する難題が山積している現状を東京都の報告書でうかがい知ることができる。

2002年にまとめられた東京都環境基本計画書⁸⁾には、東京都が現在直面している都市環境の課題が詳しくまとめられている。この基本計画書から、一般的に過度に都市集中が進んだ場合に生じると思われる課題を直視することが出来る。この計画書は1997年版の改訂という位置づけになっており、それ以降の5年間に限っても次の2つの大きな変化が生じたことを特記しており、都市環境問題の緊急性が知られる。

【特記1】：地球温暖化の進行、有害化学物質による環境汚染、産業廃棄物処理に伴う問題点

【特記2】：「ディーゼル車NO作戦」として、排出ガスの対策強化の緊急的課題

すなわち、東京都には直面する二つの環境の危機があり、第一は自動車の増大に伴う大気汚染や多量に氾濫する化学物質による健康被害の懸念などの直接的な危機である。第二はそれまでの

大量生産・大量消費に伴う廃棄物の増加、都市のスプロール的拡大による緑の減少、肥大なエネルギー消費に伴うヒートアイランド現象の発生、二酸化炭素などの増加による地球温暖化など、都市と地球の持続可能性の危機であるとしている。

これらの特記された危機は東京都の問題と言うよりは、国内外の大都市が直面するあるいはするであろう共通の課題といえ、東京都では多様な都市機能が高密度に集積し、文明の便益を享受した分だけ危機も集約的に現れていると理解されている。また、これら東京における環境の危機は、既に経済性と五分五分のトレードオフで納得できる段階を遙かに超え、極めて深刻な状況にあるとさえ報告書で断言している。そのような現実的な状況の中で、東京都として取り組むべき大きな課題として、

- 《1》健康で安全な環境の確保
- 《2》都市と地球の持続可能性の確保
- 《3》自然環境の保全と再生

を施策の柱に挙げ、次のような具体的例とその対応についてまとめている。

健康で安全な環境の確保に関しては、大気汚染の問題、有害化学物質の問題、騒音・振動の問題を挙げその原因の具体的例としては浮遊粒子状物質、オキシダントの増加、土壤・地下水・河川の汚染、また、建設作業・工事としている。その対策として、ディーゼル車の規制、車の低公害化・低燃費化、汚染土壤・水質の浄化、低周波音・電磁波等の低減策を実施するとしている。

既にこれらの対策の実施は新聞紙上で散見でき、東京都にとっての緊急な課題であることが実感される。

都市と地球の持続可能性の確保に関しては、ヒートアイランド現象の問題、地球温暖化の急速な進行問題を挙げている。これらの諸問題は都市における真夏日の増加、熱帯夜の増加、熱中症の増加、集中豪雨の増加等が端的に示しており、具体的に都市生活の障害となっている。

その具体的例を見るために、東京都の気候変化について東京管区気象台のデータ⁹⁾を利用してその傾向を調査した。東京都の1880年からの平均気温の推移を図9に示す。ここでは、東京都の年平均気温および最低気温変化の傾向を明確にするために、データを10年移動平均値でまとめグラフ化した。10年移動平均のデータ処理は少しスパンが大きいかもしれないが、気候変動という超長期的時間スパンを議論するには10年間はまだ狭い位の期間であり、このような短時間の処理で現象が顕著になることこそ、事態の緊急性を物語るものと思われる。

同図より知られるように、最低気温の上昇が顕著である。同図には最高温度の推移を示していないが、最低温度より変化量は少ないとされている。

東京都の熱帯夜、真夏日、高温日の年間日数の推移を図10に示した。同図も、気象統計データを10年移動平均値としてまとめたものである。ここで、真夏日とは最高気温が30℃以上の日であり、熱帯夜とは最低気温が25℃以上の日、高温日とは最高気温が35℃以上の日であ

る。真夏日は既に年間約 50 日を数え、グラフ上の変動幅が大きいものの増加の傾向が見られる。熱帯夜については著しい増加傾向を示し、年間 30 日を越える状況にあり、高温日もやや増加傾向を示している。

このような傾向の原因として、地球規模での地球温暖化ばかりでなく、都市のヒートアイランドによる影響も大きいと解析されている。また、都市のヒートアイランド現象についてはさらに深刻な予測もあり、例えば、ヒートアイランド現象を 3 次元の数値解析によって得られた結果の例¹⁰⁾によれば、東京都大手町では、2031 年の夏の夕方、43℃以上になるとの計算結果も報告されている。これらの予測の根拠には、現状のヒートアイランドの原因が改善されない事を前提としていると解釈されるが、いずれにしても東京で居住するには空調設備が不可欠であり、特に少子高齢者時代となる高齢者にとって死活問題であることは議論の余地がない。

自然環境の保全と再生に関しては、緑の再生、水環境の回復問題を挙げている。

これらの具体的な例として、森林・緑地の減少、河川・海域の水質汚濁等を挙げている。

その対策として、生活・事業排水の処理、環境用水の導入、再生水等の活用、地盤沈下の防止等を実施する検討を進めているとしている。

これら都市の諸問題の対策として、地域冷暖房システムの積極的な導入、自然エネルギーの導入、風道の配慮、人工廃熱の抑制等が検討されている。ここで分かるように、東京都ではすでに地域冷暖房システム導入を対策の柱に位置づけていることが興味深い。

以上、都市が直面する環境問題、自然破壊の回復等の対策にエネルギーの有効利用あるいはゼロエミッション等による対応ばかりでなく、河川の浄化や再生水の活用等も東京都の具体的な計画に含まれていることは地域熱供給システムの幅広い有効活用方法を考える上で注目すべき事項が多数散見でき興味深い報告書であるといえよう。大都市の地域熱供給システムはすでにステータス性の領域を越えて、死活問題回避の手段と考え、都市の不可欠システムと考えた方がより現実的である時代となっているのかもしれない。

3. 2. 2 都市の自然災害問題

既に述べた「21 世紀の国土グランドデザイン」において、都市災害のなかでも人口、建物の密集地域における地震災害への対応が急務であることが指摘されている。阪神淡路大地震をはじめ、関東大震災等の地震に伴う大きな被害例は数多いが、大地震での人的被害に関するまとめは比較的少ない。その理由として、例えは先の大戦末期に発生した三河地震は軍事戦略的な理由により記録そのものが殆どないなどは極端としても、死傷者数、その発生状況については記録がすくないのが現状である。

日本の地震被害について、新編日本被害地震総覧¹¹⁾に詳しくデータが記載されているため、そのデータから人的被害を抽出しグラフ化することとし、結果を図 11 に示した。同図の縦軸は地震による死亡および行方不明者総数の対数を、横軸は地震の規模を示すマグニチュード M を示した。同図作成にあたり、死亡・行方不明者数の抽出条件を 2 人以上とした。それは、データベースである同要覧を検討中に比較的小規模な地震においても、死亡者数が 1 名の記述が散見された

ためである。その理由として、小規模地震の死者は地震災害と言うよりは、地震の揺れにびっくりしたり、あわてた等の個人的要因が背景にあるものとし、同図作成の過程で削除した。また、震源地がほぼ海岸あるいは内陸地にあることが確認できた地震データを抽出してプロットした。その理由は、震源地を沖合とする地震では、大規模の地震でも死亡・行方不明者が出ない地震データが多く、また津波が発生すると比較的小さい地震あるいは遠距離の地震であっても、局所的に相当量の被害が発生する場合が散見され、本調査の趣旨からはずれるため上述の震源地の制限を設けてデータを抽出することとした。

一方、海外の地震の場合には、日本の被害状況とその傾向が異なる場合があり同図作成過程で削除した。例えば米国においては、比較的大きな地震においても死亡・行方不明者は極めて少ない傾向になることが分かった。その理由として、米国の場合は住宅の集密度が低く、火災時の人的被害が少ないとすると推測した。一方、アフガニスタンの例では、地震としては小規模であっても多数の死亡・行方不明者数の発生が報告されており、その原因として、地震に伴う大規模な山の崩壊により都市が消滅した例など、地盤が極端に軟弱な地域の特殊性が大規模被害発生につながっているものと推察した。

同図から知られるように、マグニチュードが大きくなるほど、死亡・行方不明者数は増加している。これは、マグニチュードは地震エネルギーの対数であることからすると、死亡・行方不明者数と地震発生エネルギー量とは比例関係にあることが概略理解できる。被害者数の最大値はM=6で約3人、M=7で約3,000人となり、データは幅広く分布した。これらデータプロットを地震に伴う火災発生記録の有無により分類すると、データ点は大きく2領域に分かれることが分かった。すなわち、火災発生の記録がある場合には死亡・行方不明者総数が多い領域に位置することである(図中黒抜き点)。その境界は火災発生のない場合の被害者数の上限を示すこととなり、例えばM=7の場合、約100名程度の死亡・行方不明者数となり、火災発生記録がある場合の3,000人に比べ、大幅に少ない事がわかる。ここで参照したデータベースの総覧には、死亡原因と死者数の厳密な関係を推定する記載がないが、地震に伴う大規模火災の発生が人的被害総数に大きく影響することは否定できず(次節に東京都の例を示す)、内陸型の大地震発生の際の人的被害を軽減するためには地震に伴う都市火災発生を防止する方策が急務となり、それが可能なシステムは前述の社会受容性の要因を満たすことになり、以後の検討に重要な事項を多く含んでいる。

3. 2. 3 大地震に伴う人的被害想定

前述のデータベースの要覧では地震に伴う人的被害が明確でなかった。そこで、内陸型の地震発生に伴う被害について東京都がまとめた被害想定に関する調査結果¹²⁾を分析した。報告書の中で、東京区部に直下型地震が冬の夕方6時にマグニチュードM=7.2規模で発生した場合の被害を解析している。東京区部での死者数は原因別に、

①火災によるもの	= 4,732人 (70%)
②建物被害によるもの	= 1,753人 (26%)
③ブロック塀等の被害によるもの	= 189人 (3%)
④崖崩れによるもの	= 30人 (0.4%)

⑤列車脱線によるもの = 13人 (0.2%)

とし、死者数を総計 6,717 人と推計している。死亡の原因別では火災による死者数が最も多く、全死者数の約 70%を占めることとなる。また、区部の中では大田区、世田谷区、江戸川区等で死者が多いこと、出火直後よりも延焼中での志望者数が多いこと等も報告されている。なお、同予測では火災による重軽傷者数は約 18%と推計されており、大規模地震発生に伴う火災発生による人的被害の重要性が知られる。

また、同じ直下地震でも多摩地区に発生した場合には、多摩地区で死者が 517 人と推定されており、このうち火災による死者は約 7 %であり、多くは建物被害によるのであり、人口密度あるいは住宅密度の高い都市地域では地震そのものよりは、地震に伴って発生する火災による死者は急速に増加し、その対応策は急務であるといえよう。

同様の大都市での地震に伴う火災による死者の推定に関しては、内閣府中央防災会議でも首都圏での直下型地震による被害想定を報告書¹³⁾にまとめている。この報告書は最近マスコミでもセンセーショナルな報道をされたことで記憶に新しいが、同報告書では 18 のタイプの地震動を想定しており、最大でマグニチュード $M=7.5$ 、最小で $M=6.9$ のケースをベースに被害想定を行っている。想定するシーズンとしては、地震発生時期が冬の朝 5 時、秋の朝 8 時、夏の昼 12 時、冬夕方 18 時の 4 ケースである。被害想定項目としては、物的被害、人的被害、その他インフラ被害、経済被害となっている。

これらの被害想定のケーススタディの結果によると、被害の最大発生となる地震発生時刻が夕方 18 時、その時の気象条件として風速 15m/秒の場合での、代表的な例を見ると次のようになると報告されている。

- a)都心西部直下地震 $M=6.9$ 死者 12,000 人 (火災が原因: 64%、揺れが原因: 26%)
- b)東京湾北部地震 $M=7.3$ 死者 11,000 人 (火災が原因: 57%、揺れが原因: 28%)
- c)都心東部直下地震 $M=6.9$ 死者 11,000 人 (火災が原因: 59%、揺れが原因: 30%)

ここで括弧内の数字は死者の被害構成を示しており、死者の半数以上が火災によることが分かる。他のケースでも比率は異なるものの、火災による死者が最も多いことが報告されている。この報告は、前述の東京都の場合と条件が異なるものの、地震発生に伴う火災により多数の人的被害が想定されるとの結論には疑問の余地がない。例えば、都市生活において現在は暖房に灯油等の可燃物あるいは裸火を利用するが多く、それが冬季の地震被害をより大きなものとする要因になっていることは否定できない。そのため、地震等に伴う大規模火災発生の低減方策としては、可燃性燃料あるいは裸火を使用しない生活スタイルを構築することであるとも考えられる。

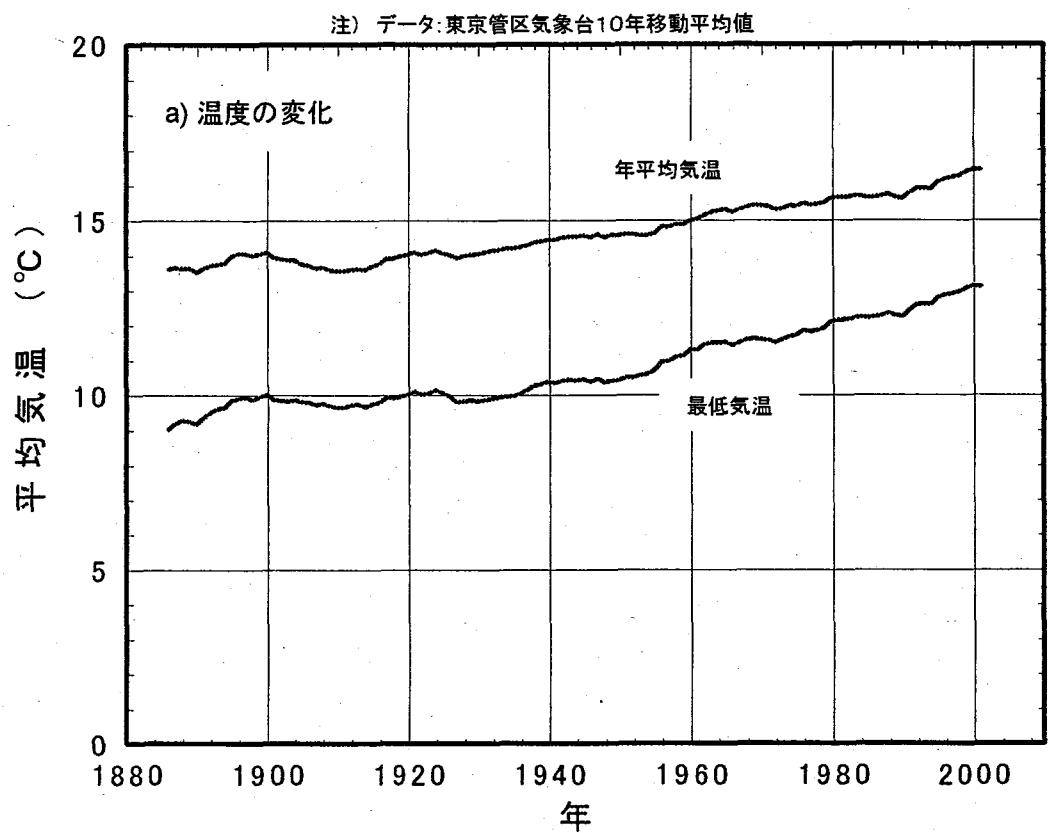


図9 東京における年平均気温及び最低気温の推移

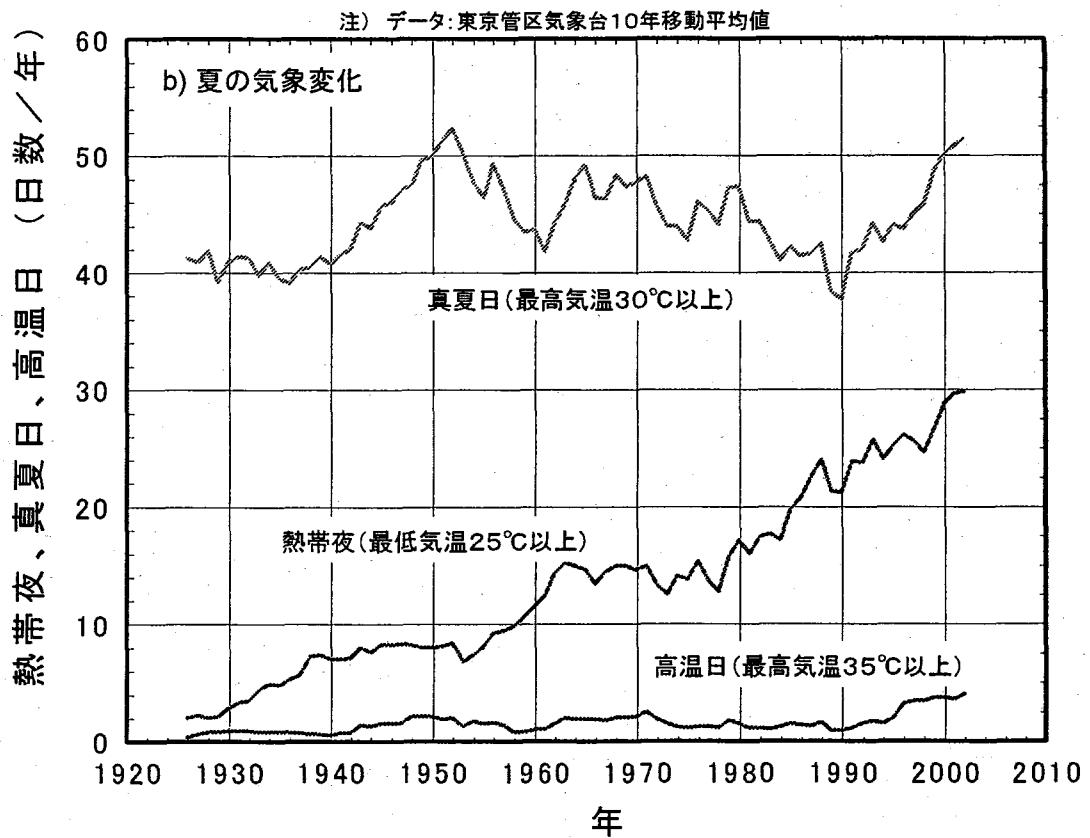


図10 東京における夏の特異気象の変化

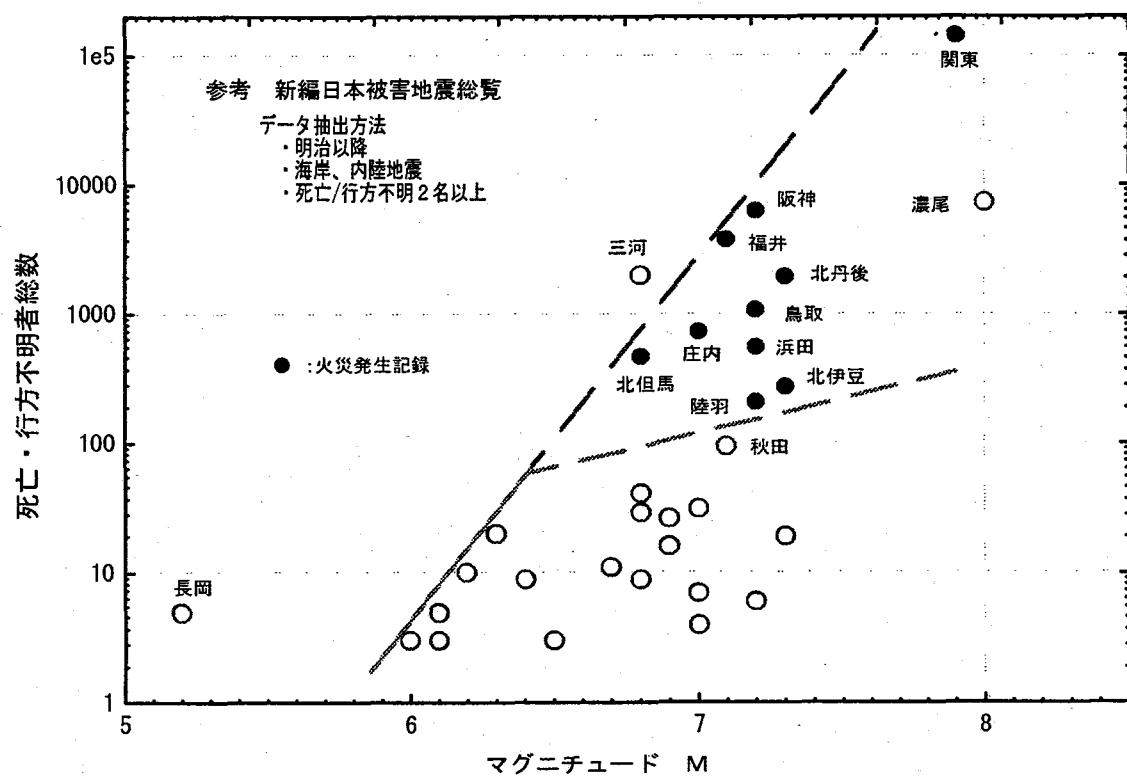


図 11 日本の地震被害における死亡・行方不明者総数と地震のマグニチュード M との相関性

4. 将来の仮想都市の想定

前章までに 21 世紀の日本並びに東アジアを中心とした世界の人口動態について調べ、東アジアにおける人口増大、都市への人口集中、都市における民生用エネルギー消費量の増大、さらにそれに伴い生じる都市の生活様式の変化、河川の汚染、緑豊かな環境の喪失等都市の社会環境に様々な問題が生じ、また地震災害をも含めると住民の生命財産までも危うくする事態に至っていることが明らかとなり、東京都などではその具体的な対策を始めていることを示した。

そこで、諸問題解決の選択肢の一つに原子力が利用可能であれば住民は原子力の便利さを実感できると考えよう。また民生用エネルギー消費の代表である冷房、暖房、給湯を中心とする地域熱供給システムによる対応について検討し、その熱源としてコンパクトで、パワフルな原子力利用の可能性について検討する。さらに、余剰熱源は汚染が過度に進んだ河川の強制的な浄化、寒冷地にあっては融雪用の熱源等、需要地の生活に密着した多様な熱利用形態が想像される。ここでは、地域熱供給システムは基本的にエネルギー需要地に設置することが不可欠であるとし、都市景観等を配慮し都市の大深度地下を利用したシステムを前提として、まず、将来の仮想的な都市についてその人口動態を予測し、消費熱量の推定をおこない、前提とする原子力システムの規模を算出し、社会受容性の観点からの検討のベースを議論する。

4. 1 仮想都市での人口動態分析

仮想都市の面積は熱供給システムにおいて熱が届く経済的な有効距離は 5km 程度であるとされていることを考慮して¹⁴⁾、一边 4.5km の正方形、面積として 20.25km² の土地とした。この土地に許容可能な仮想都市の規模としては、前述の「21 世紀の国土グランドデザイン」で提唱されている緑豊かな都市空間等を想定し、人口密度には余裕を持たせ、現在の代表的な団地（光が丘団地、千葉ニュータウン等）の人口密度計画の値等を参考し、さらに余裕を持たせその 75%とした。解析当初の仮想都市の人口動態に必要な数値を次のように設定した。

- 総人口は 10 万人
- 世帯数は 37,100
 - ・昼間の在宅世帯数を 10,795
 - ・世帯あたりの平均人口を 2.7 人
- 就業者数を 53,403 人（15～64 歳）
- 就学者数を 17,136 人

人口動態に関しては、都市問題に関連した解析等に一般的に利用されているアロンゾ型モデルを採用することとした¹⁵⁾。これは、都市への人口の出入りは生じないと仮定する非現実的な設定であるが解析の意味合いを明確にする利点があり、解析のベースにした。なお、解析に必要な数値データベースは日本の統計を参考に算出した。さらに仮想都市の条件として、都市は集合住宅、オフィスビル（商業用、小売店、病院、学校等を含）で構成することとし、仮想都市の気象条件は東京の観測データを参照することとした。

仮想都市のエネルギー消費の基本となる人口の変動は、厚生省の世代別の出生・死亡率¹⁶⁾をも

とに 50 年間の人口変化を概算し、その結果を図 12 に示す。同図より、仮想都市の人口は、解析開始後の数年後にピークを迎える、その後は減少し解析開始の 50 年後には約 8 万人を下まわる結果となった。同図には世帯数の変化についても記したが、50 年後の世帯数は約 38,000 と概算され、人口は約 20% 減少することに反し世帯数の減少量は約 5% 程度と比較的少ない結果となった。このことは将来仮想都市は核家族化することを示している。また、高齢化率を見ると解析当初は約 17% であったものが 50 年後には約 36% となっている。ここで、高齢化率とは 65 歳以上の人口と全人口の割合である。これらの人口動態の傾向は日本全体を予測した結果¹⁷⁾（図中には統計値と記した）と類似する結果となっており、核家族および高齢化が顕著になることをあわせると、消費エネルギー量は人口数よりは世帯数に依存することから、この動向は消費エネルギーの観点からきわめて重要であり、以下の検討で留意すべき事項を多く含んでいる。

4. 2 仮想都市での消費エネルギーの検討

4. 2. 1 热需要量の分析

仮想都市の冷房、暖房、給湯に必要な需要エネルギーを概算するため、その基本となる仮想都市の床面積に留意して建築物量を設定した。仮想都市の建築物には集合住宅、オフィスビルおよびその他としてデパート、スーパー・マーケット、ホテル、総合病院、学校、小売店、飲食店ならびに劇場など一般に都市を形成するに必要な最小限の建物の種類と数量を算出した。

仮想都市は理想的な未来都市でもあるため、職場と住居が近接したモデルを前提とし、集合住宅は 1 棟当たり 100 世帯入居の高層マンションのビルを 400 棟配置することとし、各 1 世帯の床面積は 69.35m² とした。オフィスビルについては 1 棟の延べ床面積を 10,000m² とし、仮想都市に 40 棟建設することとした。オフィスビルでの就業人員は 1m²あたり 0.1 人と仮定している。また、総合病院の床面積は 122,000 m²、学校の床面積は 247,000 m² とした。これらの仮想都市を形成する各種建築物における間欠空調による最大熱負荷を表 1 に示す^{18)~21)}。ここで、間欠空調とは冷房、暖房を必要な時のみ空調設備を運転する方式で、後述する終日空調が一日連続して空調設備を運転する方式と区別する。同表の熱供給時間に間欠空調時間帯を示しているが、ホテル、病院のように 24 時間運営されている建物では実態として終日空調をおこなっていることとなる。この必要熱量計算では各建物の延べ床面積のうち空調が必要な面積を 70% と仮定し、建家の温度差を極力回避したいわゆる「環境バリアフリー」の達成を念頭に設定した。また、一般家庭における押入、オフィスにおける物置の類は空調しないこととした。

一般に、ホテル、スーパーの床面積あたりの熱負荷は大きいが総床面積が比較的少ないと、一方、集合住宅は床面積あたりの熱負荷が少ない一方で総床面積が大きいなどの理由により建物別での熱負荷に大きな差が生じたことが知られる。

4. 2. 2 热供給量の日変化の分析

仮想都市に必要な熱供給量の 24 時間の変化について夏、冬および春・秋の 3 シーズンを個別に概算した。仮想都市での冬季の最大負荷日における消費エネルギーの日変化を図 13 に示す。間欠空調の方式による最大熱消費量は冬期の朝 7 時頃に生じ、その量は約 470MW である。ついで、夕方 6 時頃に第 2 のピークが生じ、その量は約 460MW と算出された。最大のピークを示す

朝の場合には、それまでの深夜における熱源負荷は約 20MW と最低値を示し、5 時頃から急速にピーク時の 7 時ごろにかけて最大の熱源負荷に変化することが知られる。また、夕方の第 2 のピークにおいても、程度の差はあるものの熱源負荷の急激な変化を示している。このことは、熱源の熱供給システムに対し負荷追従性が強く要求されることであり、熱供給システムの性能上あるいは管理上にきわめてロスが多く、システムの経済性の低下につながる要因であるため、何らかの対応を必要とすることが示唆される。そこで、同図には間欠空調方式を終日空調方式に変えた場合の解析についてもその結果を併記した。終日空調方式の場合の特徴としては、間欠空調方式での二つのピークの絶対値が約 340MW 及び 380MW に低減すると共に、深夜の負荷が約 110MW に上昇していることが知られる。このことから、終日空調方式の場合には、間欠空調方式に比べ、最大負荷が軽減されるばかりでなく、負荷の変化速度も軽減される効果が認められ、熱供給システムの熱源負荷追従性を緩和し、初期のシステム規模の簡素化に役立つ効果が期待できる。

なお、終日空調方式は部屋がいつも一定の温度にセットされている訳で、現代流にいえば「もったいない」使い方ではあるが、一方で、社会受容性で論じた要因分析の上でも便利さ、あるいはステータス性等の評価を上げることにもつながることを考慮すると、熱供給システムに対する総合的な評価としては高くなることが想像される。

熱供給システムの熱源負荷追従性に優れる終日空調方式による熱源負荷の日変化の季節別の解析結果を比較して図 14 に示す。前述のように冬期が熱源負荷の最大ピークを示し、次に夏期、続いて春・秋期の順で熱源負荷は低下する事が知られる。夏期のピークは夕方の 6 から 7 時頃に発生し、その値は約 220MW である。また、朝 7 時頃のピークはその値が減少し、日変化としては冬期の約 1/2 になっている。春・秋期にはこの傾向が更に進み、夕方のピークの時刻はほぼ同じであるが、その値は冬期の約 1/3 程度にまで減少している。

4. 2. 3 热供給量の年変化分析と热供給システム効率の改善策の検討

終日空調及び間欠空調による空調方式の違いによる年間の消費熱量の変化を図 15 に示す。同図より年間を通し、間欠空調の方が終日空調に比べ使用熱量は低めとなっているが、傾向は変わらない。なお、この評価では後述する蓄熱システムの導入による改善策を含んでいる。終日空調方式は間欠空調方式に比べ、年間を通してエネルギー消費量は夏場にわずかに高めとなるが、熱供給システムの設備容量を低減し、設備利用率を改善することが期待され利点の多い方式と考える。

終日空調方式による、長期運転における使用熱量の年間変化を図 16 に示す。ここでは、2000 年（解析当初）、2012 年（12 年後）及び 2050 年（50 年後）についての解析結果を示す。システム運転開始から 12 年後の 2012 年の結果は 2000 年よりわずかに増加するものほとんど差違が認められないが、50 年後の 2050 年には、使用熱量は年間を通して減少し、特に冬期及び夏期において約 10% 程度の減少が認められる。このことから、熱供給システムの使用熱量は約 50 年後においても、変動の幅は比較的少なく、当初の設備が長期にわたってシステム容量に過不足なく利用出来るものと考えられる。これは、人口が変化し、人口減少あるいは高齢化等の状況が変化した場合であっても、世帯数の変化が少ないいわゆる核家族化の状態となることにより床面積の変化量が少なく、1 世帯における必要な消費熱量に依存するためこのような結果になったもの

と思われる。なお、この試算では、冷房用の吸収式冷凍機の成績係数（COP）を 1.3、熱交換器、配管等の熱損失割合を 0.04 とした。また、昼間の在宅世帯数を 25,000 世帯としている。

仮想都市での年間負荷率向上のため、空調の運転方法として間欠運転方式と終日運転方式による利用法の改善、システム改良として蓄熱システムの導入および熱利用効率の向上としてカスケード、さらに蓄熱とカスケードの併用について検討した。ここで、蓄熱設備とは、負荷変化を平坦化する手段として、負荷が少ないときに熱を蓄積するもので、既に熱供給システムでは各種の方法が利用されており、いわば熱供給システムのハイブリッド版といえる。

また、カスケード方式はシステムの中で出る排熱をさらに温度が低下するに合わせて段階的に熱利用し熱のエミッションを低減することを目的とするものである。解析当初年（2000 年）の例を表 2 に示す。空調を間欠運転方式でおこなった場合に必要な熱源の設備容量は約 467MW であり、この年間設備利用率は 13.4% と極めて低い。この場合を指數 100 とすると蓄熱システムを導入した場合には、設備容量は約 250MW に低減でき、この量は蓄熱設備を利用しない場合の 53% となり、年間利用率も約 25% と向上し、相当の設備改善効果が認められる。一方、終日運転方式の場合には設備容量は 387MW となり、間欠運転方式の場合の 83% に低減できる。さらに、蓄熱設備を利用することにより、設備容量は 252MW 程度になり蓄熱設備を利用しない場合の 65% である。この場合の年間利用率は 25.8% であり、設備利用の改善効果がさらに向上している。間欠運転で蓄熱設備がない場合から比較すると、終日運転及び蓄熱設備の併用により設備容量が 54%、年間利用率で 193% の大幅な改善が期待できる。

カスケード利用の場合には設備容量、年間利用率は下がる。そのため、蓄熱設備及びカスケード利用を併用した場合をみても、蓄熱設備単独の場合よりも改善効果は低下することが知られる。ここでのカスケード利用は冷房での廃熱を利用する前提として解析しているため、冬場での効率改善への寄与が少ないことがこのような結果となっていると考えられる。

一般的にはカスケード利用は熱源を段階的に使用する場合のもので、例えば次のような温度域と利用方法が考えられる。

<160~180°C>	吸収式冷凍機の熱源 (→ 冷房)
<110~150°C>	浄水化の熱源 (→ 川の浄化、下水の浄化)
< 60~ 80°C>	給湯の熱源
< 50~ 80°C>	暖房の熱源
< 25~ 40°C>	床暖房の熱源
<約 40°C以下>	融雪の熱源

これらの例に見られるように、熱のゼロエミッションを目標としてシステム利用を工夫することにより、熱利用率の向上が図られる。例えば、河川の浄水に関しては、既に述べた東京都の環境改善計画にも挙げられている。東京都が熱源を利用する計画となっているかどうかは定かではないが、インフラの整備と合わせ具体的に排熱の有効利用などの施策を立てる必要があろう。また、床暖房と暖房の組み合わせ等についてはここでは解析していないが、現実の生活を考えるとさらなる熱利用効率の向上に寄与すると考えられる。さらに、融雪は東京ではそれ程大きな問題

ではないが、積雪地帯での都市化を考えると、現在でも道路の除雪費用は莫大な金額に上っていると言われており、また、年間の雪下ろしによる人的被害もかなりの人数になっていることから、インフラ整備に必要な経費はそれほどの問題とはならないとの意見もあることから、今後この低質エネルギーを含めた総合的なカスケード利用には期待が大きい。

以上、仮想都市モデルによる地域熱供給システムの消費熱量の年変化等の結果から、10万人規模の仮想都市では、供給方法およびシステム改良することによりその供給に必要な熱源として約熱出力 240MWt が算出された。

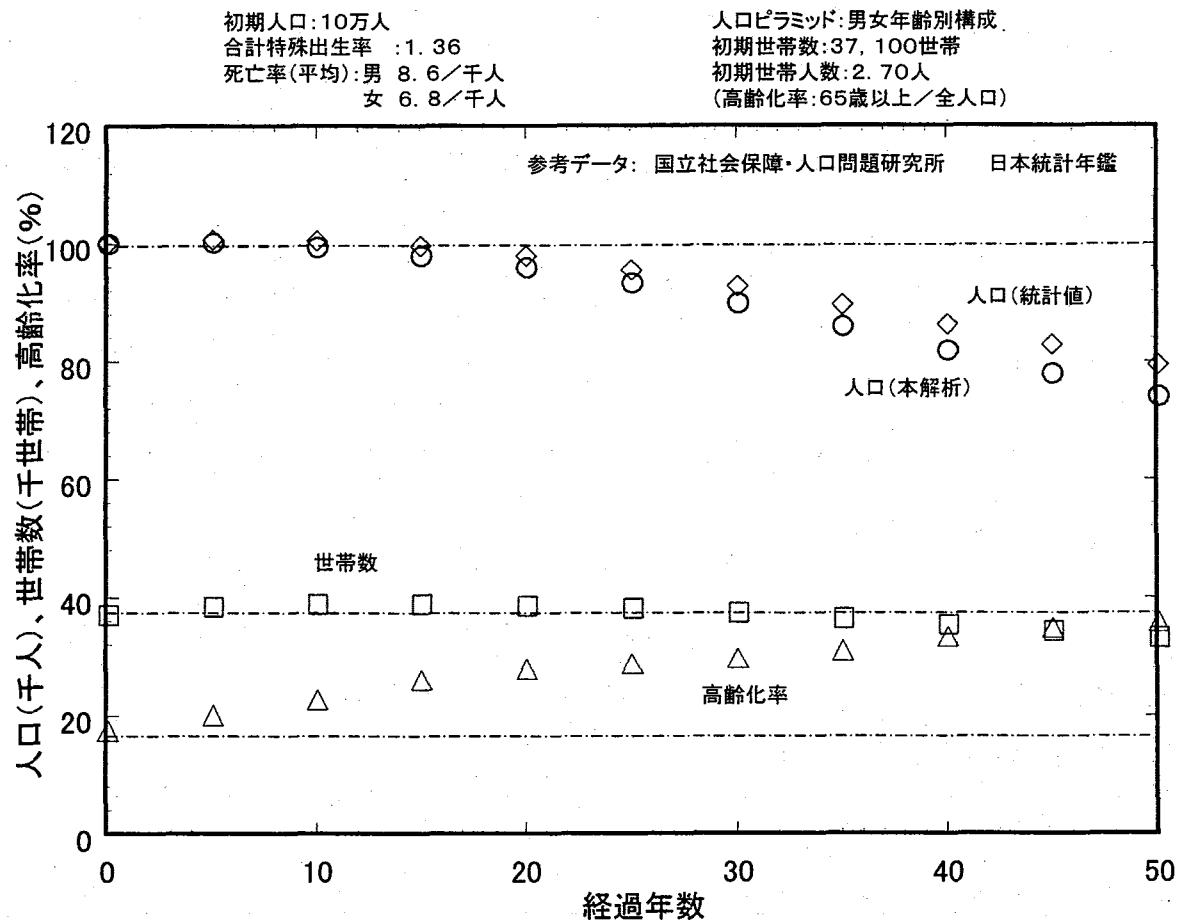


図 12 仮想都市モデルにおける人口、世帯数、高齢化率の解析

表 1 仮想都市における主な建物の間欠空調による最大熱負荷

	空調面積(*) (千 m ²)	最大熱負荷 [W/m ²]			熱供給時間	
		冷房	暖房	給湯		
集合住宅	1941.8	104.0	144.0	38.1	6:00~24:00	
オフィスビル	280.0	98.6	82.4	—	6:00~18:00	
その 他	デパート	26.6	217.0	137.0	—	8:00~20:00
	スーパー	65.8	215.0	195.0	—	8:00~20:00
	ホテル	64.4	127.0	207.0	256.5	0:00~24:00
	病院	85.4	91.0	112.0	42.3	0:00~24:00
	学校	172.9	44.0	37.0	—	6:00~18:00

*延床面積のうち、収納スペースなどを除いた 70%の部分

参考 : HASS 112 冷暖房熱負荷簡易計算法、設計用最大熱負荷計算法、蓄熱式空調システム基礎と応用 (以上、空気調和・衛生工学会)、(社) 日本原子力産業会議報告書

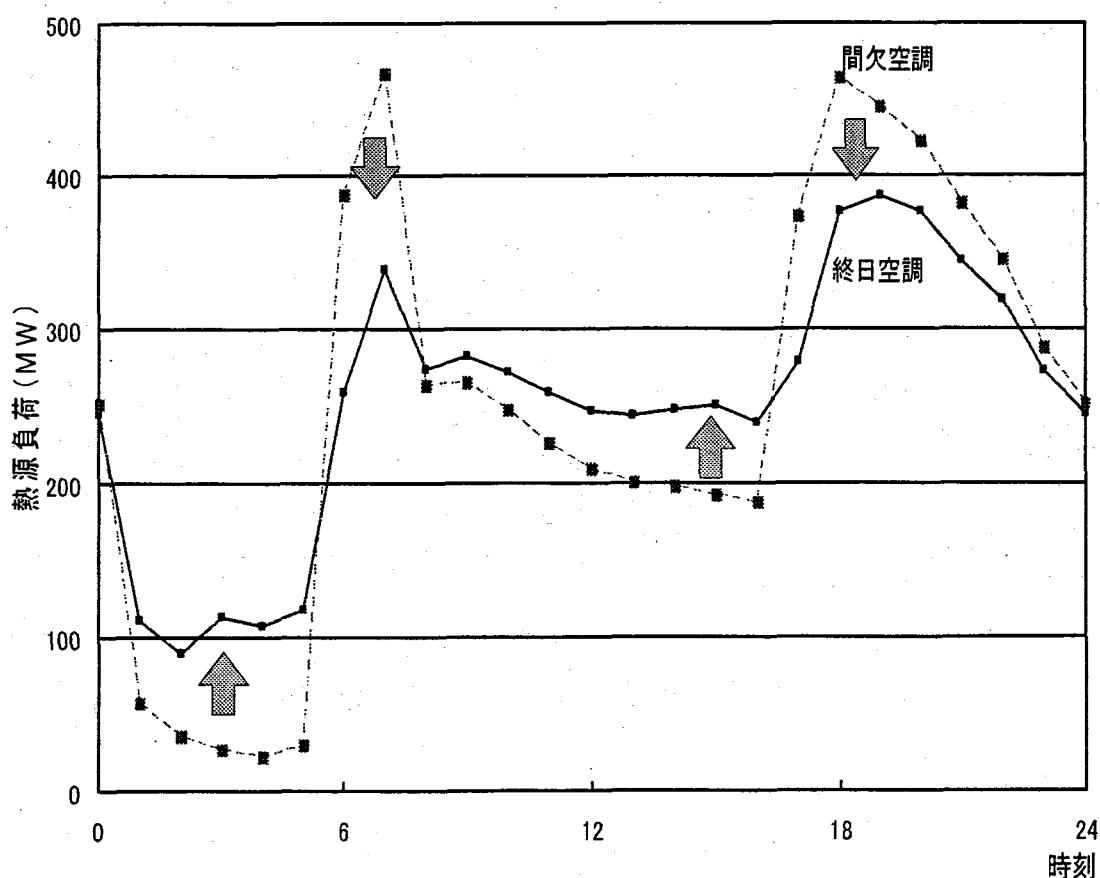


図 13 仮想都市の年間最大負荷日における消費熱量の日変化

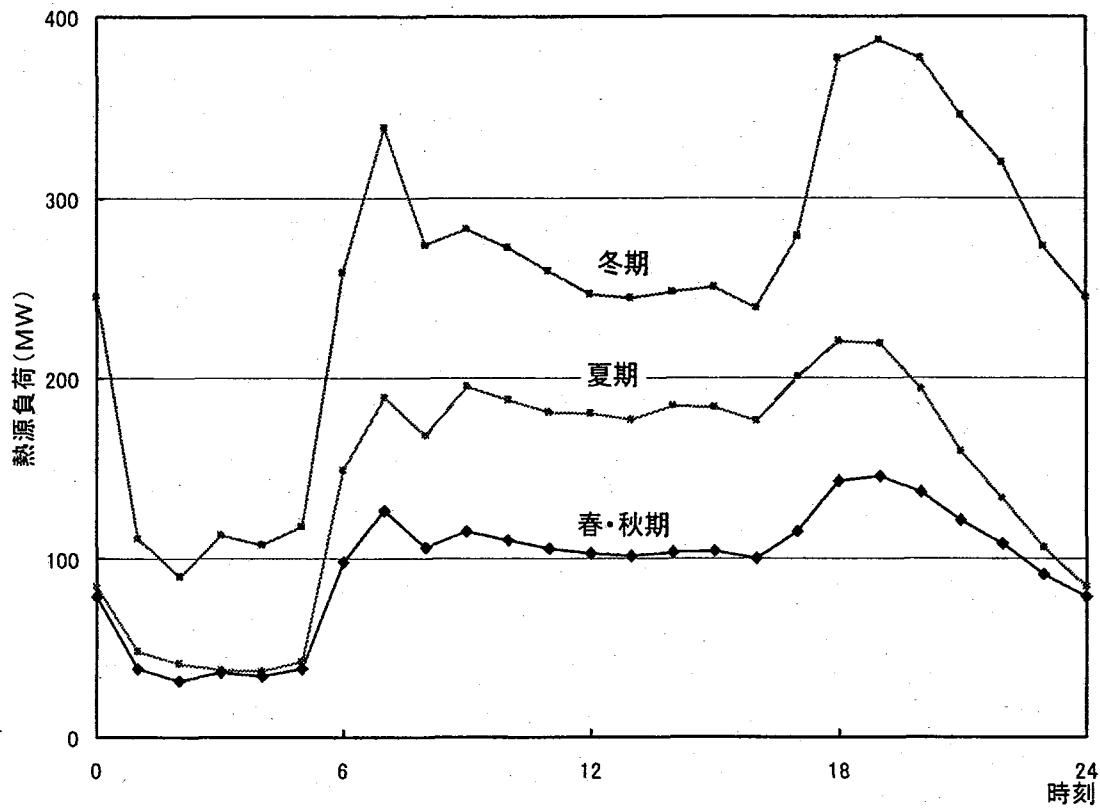


図 14 仮想都市における年間消費エネルギーの日変化

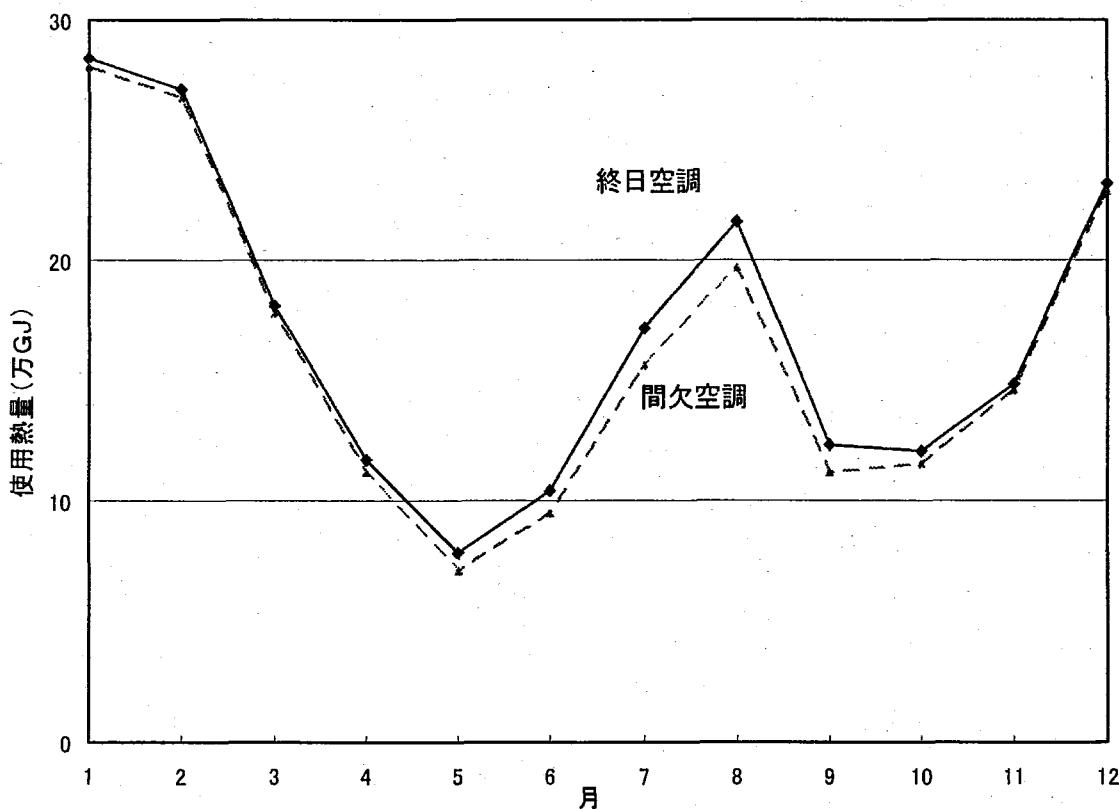


図 15 仮想都市における改善策後の供給量の年変化

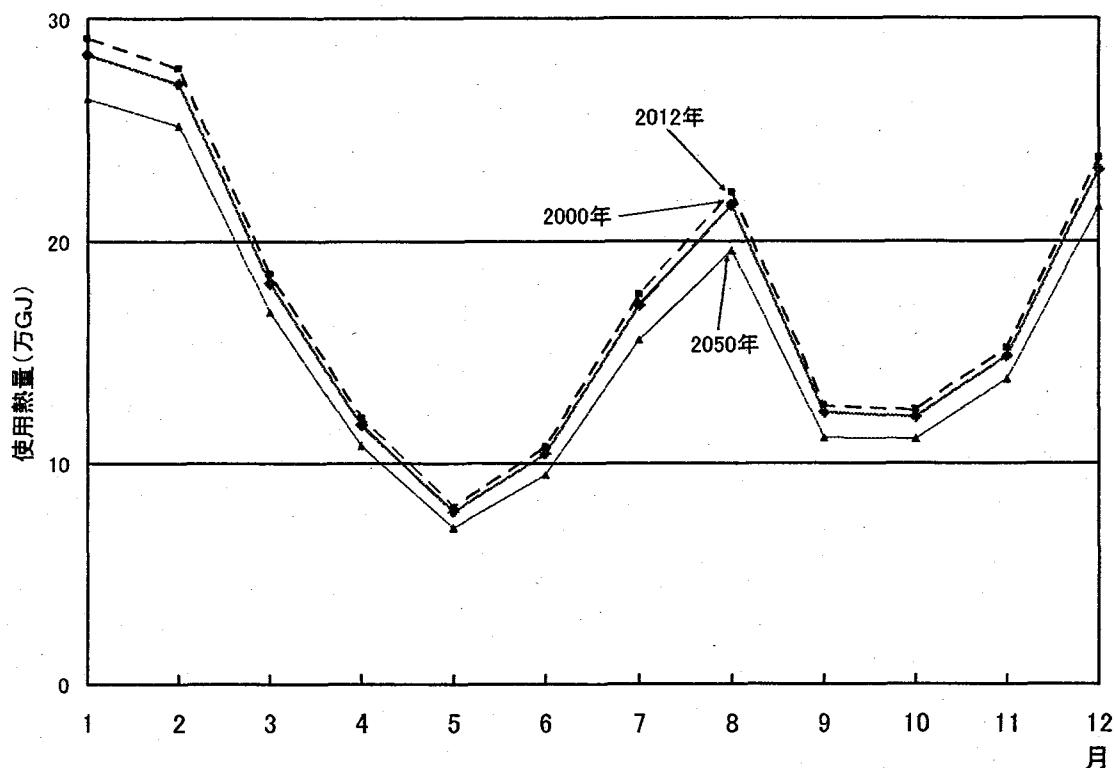


図 16 終日運転における長期運転の設備利用に及ぼす影響

表 2 热供給システムの設備改善効果の検討

運転方法	項目	改 善 方 法			
		なし	蓄熱	カスケード	蓄熱 + カスケード
間欠運転	設備容量	MW	467.4	249.6	439.3
		指数	100/[100]	53/[53]	94/[94]
	年間利用率	%	13.4	24.9	13.0
		指数	100/[100]	186/[186]	97/[97]
終日運転	設備容量	MW	387.1	252.2	363.8
		指数	100/[83]	65/[54]	94/[78]
	年間利用率	%	16.8	25.8	16.6
		指数	100/[125]	154/[193]	99/[124]
					152/[190]

(注) 指数: 改善方法なしを100 []: 間欠運転、改善方法なしを100

5. 社会受容性に優れた原子炉システムの提案

人口が集中した大都市での大規模災害あるいは環境問題に対処するためには、地域熱供給システムの導入への期待が大きいことについてすでに述べた。さらに、「21世紀の国土グランドデザイン」にも述べられている「将来の都市の理想的な姿」を想定した仮想都市のモデルを設計し、現在未利用となっている大深度地下を最大限利用することによる地域熱供給用原子炉システムを検討することとした。

5. 1 社会受容性を考慮したシステム性能の検討

熱供給の有効距離が5kmであるとして前章にて推計した仮想都市に必要な消費熱量より、必要な熱源は240MWtで、吸収式冷凍機の利用を考え、最高温度は180°Cとなる。設定した熱利用条件は余裕のある数値であることから、ここでは必要な熱源を200MWtとして以下の検討を行う。この熱源を維持するためには、燃料交換やシステム管理等を考慮すると、熱出力100MWtの原子炉2基が必要となる。ただし、都市にはすでに様々な熱供給手段が存在するため、それらとのベストミックスを考えることが現実的であり、コスト的にも安くなると、既設インフラの状況等の設定方法に解析結果が大きく左右される可能性が高いため、以下の検討では、原子炉導入に最も厳しい原子力単独による熱供給システムを設定し、解析することとした。

地域熱供給システムの原子炉に要求されるシステム要件について社会受容性で検討した要因を考慮すると以下のように整理される。

- 【要件1】小型・軽量で、現地での建設作業時間が短いこと
- 【要件2】長期連続運転が可能で、保守管理が容易であること
- 【要件3】耐震性、耐火性等自然災害に優れていること
- 【要件4】立地場所の自由度が高いこと
- 【要件5】有効な離隔距離を確保する仕組みが整っていること
- 【要件6】安全性、信頼性が高いシステムであること

都市に建設する場合、工事に伴う生活の不便さ、都市美観等の観点から現地作業時間の制約が多く、小型軽量化することにより、工場生産の可能性が高くなり、品質保証への期待も大きい。また、原子炉を仮想都市の大深度地下に立地することとしたため、原子炉本体の小型化、特に高さを低く制限する必要がある。

システムは自然循環方式、自己加圧方式、及び一次冷却水の無浄化運転等により点検、整備作業を大幅に軽減できること、都市災害としての耐震性に優れていること、地上の既存建物、あるいは地盤の性状に左右されないこと等を配慮することとした。

原子炉システムの受動性については、システムの簡素化、運転管理の容易さ等を改善する方策として考えており、安全確保に対しては従属的とし、完全な受動性を備えたシステムの必要性は薄いとした。

5. 2 原子炉システムの概念構築

大深度地下を利用した地域熱供給システムのイメージを図 17 に示す。大深度地下には、原子炉容器、それを取り囲む原子炉格納容器および冷却用プールを内蔵した主地下空洞 2 基と補助設備、使用済み燃料プール等を設置する補助空洞 1 基、及びそれらを連結するトンネルで構成され、さらに、地上部への連結用縦坑トンネル等が付属した構築物となる。

エネルギーがさらに必要となった場合には、主空洞を増設することとし、その場合においても補助空洞は共用することを基本概念としている。また、原子炉システムは春秋季には必要な負荷率は下がるため、原子炉 1 基は停止する余裕が生じ、燃料交換はその時期に行うこととする。燃料交換時の炉内構造物の取り扱いは、簡便な機器により実施可能とともに他の空洞でも共用できる設計とすることにより、主空洞には常設のポーラクレーンを設けず、空洞の高さを低減できるよう努めた。

原子炉システムの主空洞内の概念を図 18 に示す。燃料は年間負荷率 50%、10 年間の燃焼が可能な炉心を目標として、濃縮度は 4.3% とした。一次系の運転圧力は 3MPa、炉心出口温度は 233°C とした。蒸気発生器、制御棒駆動機構等を原子炉容器内に内蔵した一体型とし、一次冷却水ポンプ及び加圧器を必要としないシステムとすることで、小型・軽量化ならびに原子炉容器貫通部の減少を図った。ここで、年間負荷率は年間の消費エネルギーと設備の年間可能供給量の割合である。また、この原子炉システムではボロン水による反応度制御を行わないこととし、運転中は一次冷却系の水質管理を必要としないシステムとしたため一次冷却材が原子炉補助系を流れないため、一次冷却材の流出事故の可能性を大幅に低減できるとともに原子炉補助系を大幅に簡素化することが可能となった。

さらに、事故時の崩壊熱を受動的に除去するために、格納容器の上部に非常時の崩壊熱除去に用いる冷却水を貯蔵する蓄圧水タンクを設けている。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、原子炉容器からの放熱を低減する機能を備えている。事故時には、格納容器注水弁が開き、上部蓄圧水タンクから蓄圧、真空力及び重力により落下した蓄圧水タンク内の水により原子炉炉心からの崩壊熱を炉容器表面を通して除去する。格納容器内の水は原子炉容器の上部に位置する非常用格納容器水冷却設備（冷却用ジャケット）により冷却される。さらに、冷却用ジャケットは地下空洞内部に設置する大型冷却用プール水により冷却される概念となっている（図 24 参照）。

5. 3 大深度地下を利用した地下空洞方式による立地

大都市における原子炉による熱供給システムの一つである地域熱供給システムの設置場所としては、最近我が国で施行された大深度地下利用に関する法律を積極的に利用することとし、小型炉用地下空洞のその可能性について施工法および耐震性の観点から検討した。

原子炉格納容器が設置される大深度地下の主空洞の大きさは、空洞安定性あるいは建設費に影響が大きいため、できる限りの小型化が望まれる。そのため、詳細は後述するように大深度地下空洞への原子炉システム搬入を考慮して格納容器を 2 分割できる構造とし、地下空洞の高さ及び内径寸法を 35m 及び 24m と概算した。地下 50m 以深の大深度地下におけるこのような大型の上下半球円筒型地下空洞のコンクリート構築物の建設、とりわけ軟弱な地盤である第四紀層での建設については我が国での実績がないことから、建設方法の検討ならびに建設時および運転時にお

ける空洞安定性について解析した。

地下空洞の建設は地上部にすでに職住接近の大都市が存在している場合、地下空洞建設により、これら地上の既設構築物に障害が生じないことが不可欠であり、この点を配慮して空洞建設にとって最も厳しい条件を設定して工法を検討することとした。なお、新規に都市開発全体が進められる場合には、大深度地下空洞の工法もここで検討したものとは異なるものとなることが想像されるが、その場合にはコスト的には大幅な低減効果が期待される。

5. 3. 1 空洞の工事工法の検討

大深度地下を利用する都市の場合その多くは第四紀層であり、第三紀層に立地する可能性は少ないと考えられる。東京都の場合には地下数百メートルに第三紀層があり、その上に河川による堆積で第四紀層が形成している。その深さは場所によって異なっており、多摩地区では地上に露出し、都心部、東京湾で最深となり、房総半島で地上に露出する地盤構成となっている。そこで、まず主空洞建設の工事方法について第四紀層及び第三紀層での建設を比較検討し、それぞれの工事方法の流れを図19に示した。

第四紀層の場合、地盤が未固結であるため、地下空洞の建設に先立って、地下空洞の周りの地盤を安定させるため仮設構築物を建設する工法を採用することとした。すなわち、地下空洞建設領域の上部に内径約7m、直径約28mのリング状の大口径坑道を建設し、このリング状の坑道の間を弦のように内径0.9mのパイプを敷き詰め、さらにこのパイプ内部を鉄筋コンクリートで充填することとした。この円盤状の構築物は主空洞建設用の仮設構築物の天井部を形成することとなる。その後、リング状の大口径坑道から地下深部に向かって仮設構築物の完成後には断面が32角形となるように板状の壁を32枚打設し、其れによってできる連続壁を鉄筋コンクリートで仮設する。連続壁の深さは、地下の主空洞建設時に地下水が主空洞側に湧き出ることを防止できるように地下深部の難透水層にまで達するよう建設し、建設後は主空洞周りの補強と地下水対策として利用する計画である。この仮設の天井部および連続壁の工事終了後、これら仮設構築物で形成された領域の上部から地下空洞用の空間部を掘削すると同時に地下空洞軸体部（アーチ部）を鉄筋コンクリートで建設し、以下地下空洞下部まで掘削とコンクリート打設による軸体建設を繰り返し、最終的に地下空洞軸体全体を建設する。その後、空洞軸体部と仮設構築物との間を埋め戻し地下空洞の工事が終了する。さらに、鉄筋コンクリート製の空洞内面には鋼製ライナーを張り、気体状放射性物質の地中への漏洩を防止する構造を検討している。

第三紀層に地下空洞を建設する場合には、地盤が固結しており、地下空洞の掘削に地上の既設構築物を支持するに十分な強度が期待できるため、第四紀層の建設に用いた仮設構築物を建設する必要がない。所定の地下空洞に必要な空間部の容積を岩盤掘削し、地下空洞全体の掘削が終了後に、地下空洞の軸体部を下部から鉄筋コンクリートで立ち上げて構築することとなる。ただし、この場合にも、岩盤、空洞鉄筋コンクリートでの微少なクラックの発生を考慮して空洞内面の鋼製ライナーは設けることとする。なお、前述の海外における第三紀層岩盤での原子炉施設建設では、鉄筋コンクリートを用いないで、岩盤にセメントを吹付けしたり、鋼製ライナーを直接岩盤に取り付ける工法が採用されている場合があるが、地下水の問題を考慮してライナーと岩盤の間にコンクリートによる軸体を構築することとした。

5. 3. 2 空洞の安定性の検討

地盤の安定性解析は、大深度地下空洞の建設時においても地上の各種構築物への影響がでないことを目指すことから、空洞建設の進捗段階及び空洞完成後の各時期について、第四紀層及び第三紀層それぞれの地盤の変形量及び応力変化に着目した解析を行った。解析に使用した計算コードは総合地盤解析システムの SIGNAS (System for Integrated Geotechnical Numerical Analysis) コードである。第四紀層と第三紀層では、地下空洞建設方法が異なることから、解析用メッシュが異なり、接点数および要素数も第四紀層の方が多くなっている。第四紀層及び第三紀層の解析で使用したメッシュの形状を図 20 に示した。また、本解析に使用した第四紀層と第三紀層に関する主要な地盤力学特性値を表 3 に示した。地盤力学特性は過去の土木研究プロジェクトで利用された値、東京都内の各種開発に伴うボーリングデータ等で得られた値を参考に決定したが、特に弾性係数、せん断強度および内部摩擦角が両紀層間で異なっている。

第四紀層及び第三紀層における地盤の変位分布の結果を図 21 に示す。同図は建設工程の中で地盤の変形量および応力が最も大きい場合であり、その時期は第四紀層では地下空洞の躯体完成後、第三紀層では地下空洞掘削後の時期に当たり、建設段階の時期は異なっている。第四紀層の場合、変位量は第三紀層のそれより大きい数字を示しており、地上の構築物への影響に着目して地表面の沈下量をみると第四紀層では 1.11cm、第三紀層では 0.006cm であった。一般の地上の構築物に対する地表面の変化量の許容範囲は約 2~3cm とされており²²⁾、また地下空洞内部における変位量についても地下空洞の径に対して 2%以下が目安とされていること等から判断すると、ここで提唱する地下空洞の工法によれば第四紀層でも十分主空洞としての建設が可能である。

一方、土木工学で応力変化の分布を示す尺度である局所安全率については通常 1.2~1.5 が目安とされている。解析の結果から第三紀層の場合にはおおむねこの領域に入るものの第四紀層の場合に地下空洞の躯体底部でこれを下回る領域が認められるが、地下空洞は躯体自体の強度も期待できることから、この程度の値は空洞建設に支障をきたす程ではないと判断した。一方、万が一第三紀層の場合に不具合が生じた場合であっても、吹付けコンクリートやロックボルト工法等の補強方法がすでに一般土木建築の実績があり、必要に応じた対策が容易であることから、大深度地下空洞の建設は第四紀層、第三紀層ともに可能であるものと考える。

5. 3. 3 空洞の耐震性の検討

大都市の大深度地下空洞の完成後における問題として地下空洞の耐震性があり、社会受容性の要因分析、原子炉システムの要件分析においても地震への備えは最重要課題の一つであるため空洞の耐震性の解析を試みた。なお、最終的には原子炉機器を空洞内に設置した段階での機器の耐震性評価が必要となるが、原子炉機器の詳細が詰められていないこと、空洞そのものの耐震性が優先するため、解析では空洞内に原子炉機器及びコンクリート構築物相当の重量部が存在するとの仮定で計算した。

耐震性評価は高地震帯限界地震 S2 の地震動として、マグニチュード M=8.5、震央距離 68km、水平最大加速度 342gal の地震波を用いて動的解析した。解析では、大深度地下 200m を解放基盤面とし、一次元重複反射理論を用いたコード「SHAKE」により解析し、さらに地下 150m に

設定した底面粘性境界と伝達境界で構成した地盤領域を軸対称有限要素モデル「ABLE」で解析した。軸対称有限要素モデル領域は第四紀層および第三紀層で地下空洞の形状が大きく異なることから、それぞれ異なったメッシュ形状を設定して解析に供した。耐震性解析結果の一例を、第四紀層について地盤の加速度応答を図22に、第三紀層についてのそれを図23に示した。

第四紀層では、地盤表面で最大460galを示すが、地下空洞が設置される地下深度が50mから90mの領域では約200～250gal程度であり、地下深度150mまでほとんど変化がないことが知られる。一方、第三紀層では地盤表面で340galと第四紀層よりも低い値であるが、地下空洞を設置する地下深度50mから90mの領域では240～280galの値を示し、第四紀層よりもむしろ高目の加速度応答を示した。このことから、既存の原子炉が第三紀層立地を前提としていることを考えると、第四紀層の大深度地下ではそれを下回る加速度応答となることが分かった。

以上、既存の大都市の大深度に大型地下空洞を設置することに関し、建設方法、地盤安定性及び耐震性の観点から評価した結果、第三紀層はもとより、第四紀層の地盤であっても原子炉を設置する十分な強度、耐震性が確保され、地下空洞建設の成立性が示され、大都市での立地上の制約は少ないことが確認できた。

5. 4 安全設計の検討

熱供給小型炉システムは都市の大深度地下とはいえ、人口密集地に近接立地することが不可欠であることから、安全設計は特に重要であり、事故の発生防止、拡大防止に配慮した機能を具備したシステムの設計を考慮している。

事故の発生防止、長時間連続運転の要求事項を考慮して、原子炉容器はコンパクトな原子炉格納容器に内蔵し、格納容器は上下2領域で分割形成され、格納容器の上部には窒素ガス加圧蓄圧水タンクを設け、運転時においても事故時に必要な冷却水を保有する構造となっている。原子炉の概念図を図24に示す。格納容器の下部には、原子炉容器本体が配置され、格納容器との空間は運転時には真空とし、原子炉容器からの放熱を防止する断熱機能を持ち、原子炉格納容器さらにはベースマット等コンクリート構築物への放熱による影響を低減する構造となっている。この空間部分を真空にすることにより、断熱機能を有した状態で格納容器の形状寸法を小さくでき、地下主空洞の容積減少に寄与することを期待した。格納容器上部の蓄圧水タンクには約320m³の冷却水を保有しており、事故時には同タンクの底部に配置した弁が作動し、蓄圧水タンク内の窒素ガス圧、格納容器下部の真空部の吸引力および水の自重があいまって高速で原子炉容器及び原子炉容器上部に配置された冷却用ジャケットまでを冠水することとなる。また、蓄圧水タンクの容量は事故が収束するまでこの状態が維持される水量を想定している。原子炉容器の上部位置する冷却用ジャケットはさらに、地下主空洞内に配置される冷却用プールで冷却される構造となっている。なお、前述のように冷却用プールは燃料交換時に炉内構造物を一時保管する等の役割を担うもので原子炉格納容器を挟む形に地下空洞1基に2プール用意される（図18参照）。

概念構築の段階では、事故時の冷却に必要な冷却用プール水量の解析は十分でないが、その容量は地下空洞の大きさとの関係が強く、容積が大きくなれば建設時のコスト高への要因となる。そこで、大深度地下空洞を建設する際に構築した仮設構築物である連続壁等を放熱機器として利

用する方法を考え、仮設構築物の地盤側に存在する地下水を最終ヒートシンクとして活用するとの検討も進めているが、地下水の流れが十分把握されないこと、長期にわたっての冷却に利用できるかどうか不明なこと、あるいはそのような仕組みに住民の理解が得られるかどうか等今後さらなる検討が必要な事項を含んでいる。

大深度地下空洞を利用する方式は、地上の生活圏と原子炉システムを隔離しやすいことから、万が一における事故時には、原子炉格納容器の機能と合わせ、放射性物質の閉じこめに大きな期待がもたれる。一方で、大深度地下空洞は最近とみに喚起されているテロ等の不測の事態に対しても有効性が高いため、さらに住民に理解しやすい防御機能であることから、将来の需要地近接型原子炉を考える際に有力な立地法の選択肢の一つと考えられる。

5. 5 炉心設計の検討

炉心は上述の仮想都市モデルをベースに算出した、熱出力 100MWt、年間負荷率 50%で、10 年間の燃焼を目標とすることから、UO₂ 燃料の濃縮度を 4.3%とした。しかし、前述の仮想都市モデルでの消費熱量の算出で記したように民生用エネルギー需要では、年間負荷率を高めることは極めて難しい面があり、ここでは年間負荷率 25%で約 20 年間、1 パッチによる燃焼を想定し、炉心に関しては燃焼度を 23GWd/t とし、37 体の燃料集合体を装荷することとした。37 体の集合体の中で 16 体は Gd 入り燃料集合体とし適切な炉心燃焼を期待している。

燃料集合体は既存の PWR 燃料集合体に類似の正方格子状で、265 本の燃料棒が装荷されている。燃料棒は直径 9.5mm、燃料ピッチ 13.9mm とした。その結果、炉心の等価直径は 1,622mm、有効高さ 1,502mm となった。また、炉心燃料集合体を取り囲む形に可動式の反射体を配置し、中性子の漏洩を防止し中性子経済性の向上ばかりでなく、緊急時には反射体を重力落下させることにより炉停止の役割を持たせることも考慮している。

炉心には、21 体の制御棒駆動機構につながるクラスター制御棒が配置され、制御棒駆動装置は原子炉内装型を採用することとしている。21 体の制御棒の中で 9 体は制御用クラスター集合体として、12 体は停止用クラスター集合体として設置する設計となっている。本炉の炉心概念等の代表的な数値をまとめて表 4 に示した。なお、本炉は自然循環炉であるため、一次冷却水流路に位置する内装型の制御棒駆動機構は流れの障害となることも想定されるが、その場合にはハウジング部の位置を上下にずらす等を考慮することにより流路抵抗の低減を図ることも考慮している。

熱供給専用炉の場合、負荷追従性は発電炉の場合に比べ緩慢であると考えている。それは、炉心での発生熱は熱交換され最終的には、3 次系の高温水を地域熱供給システムに供給し、吸収式冷凍機あるいは温水等の熱源となる。さらに、暖房、冷房あるいは給湯の温度は最終的には利用者が好みの温度を決めることとなるため、原子炉から最終熱利用者に至るまでには供給熱を混合するに十分な時間的余裕及び熱輸送用の容量がある。そのことを考えると、炉心設計は、発電炉とは異なって、負荷追従性にタイムラグが生じても原子炉はトリップすることではなく、むしろこの特性を生かした設計上の工夫も可能となる。例えば、炉心における温度自己制御機能を利用する炉心設計も検討の余地がある。現在は、この考え方を踏まえた炉心概念の検討を行っていないが、将来的にはこの考え方の炉心設計を進めることにより、制御棒本数を減らすことも可能とな

り、それに伴って制御棒駆動機構の大幅な簡素化、流路抵抗の改善による自然循環の効率化、保守管理の改善等が期待でき、強いてはコスト面での大幅な利得が考えられる。

5. 6 原子炉構造の検討

原子炉を大深度地下空洞に立地することを想定すると、その大きさはできるだけ小さいことが要求され、そのためには、原子炉本体の大きさも小型化が望ましい。原子炉本体の基本は原子炉容器であることから、原子炉容器の大きさをいかに最小にすべきか検討を行った。以下にその概略を示す。

5. 6. 1 原子炉容器

原子炉は自然循環方式であることから、一次系流動抵抗の低減及び蒸気発生器の短尺化を図ることとした。自然循環力を得るために必要な蒸気発生器と炉心との距離を設定することとし、その際、蒸気発生器が炉心域と高さ方向で重ならないよう配慮した。それは、蒸気発生器内の2次冷却水の放射化を極力低減するためである。蒸気発生器は伝熱管の管側に一次冷却水が、胴側には2次冷却水が流れる構造とした。そこで、原子炉容器高さに影響する主項目として、次の項目を検討した。

- a) 一次冷却水の流量
- b) 内装型蒸気発生器の外径
- c) 蒸気発生器伝熱管の径
- d) 燃料棒のピッチ

蒸気発生器の寸法検討に当たり熱伝達相関式²³⁾としては、サブクール域 (Dittus-Boelter、層流平板の式)、核沸騰域 (Schrock-Grossman, Dengler-Addoms)、膜沸騰域 (核沸騰域と過熱領域の内挿)、過熱領域 (Johnson-Rubesin) の式を用いた。

a) 一次冷却水の流量

一次冷却水量と原子炉容器の高さの関係は図 25 の基本曲線のようになる。しかしながら蒸気発生器が炉心領域に重ならないようにするための制限あるいは限界熱流束 DNB を 1.3 以上とするなどを考慮して、一次冷却水流量を 600kg/s とした。

b) 蒸気発生器の外径

蒸気発生器の外径と原子炉容器の高さ、体積の関係を図 26 に示す。原子炉容器高さは蒸気発生器の外径が約 3.5m 以上でほぼ一定となり、一方、原子炉容器体積は蒸気発生器外径が約 3.1m から大きくなる傾向となるため、蒸気発生器の外径を 3.7m とし、さらにダウンカマ部を考慮して、原子炉容器の内径を 4.0m とした。

c) 蒸気発生器伝熱管の内径

蒸気発生器伝熱管の内径と原子炉容器の高さとの関係を図 27 に示す。伝熱管の内径が小さくなると流動抵抗が増加することにより原子炉容器の高さが増加する。他方、伝熱管の内径が大きくなると単位長さ当たりの伝熱面積が少なくなり、必要な伝熱管長さが長くなり、結果として原子炉容器高さが高くなる。そのため原子炉容器の高さが最小となる伝熱管の内径を 17mm とした。

d) 燃料棒のピッチ

燃料ピッチと原子炉容器の高さ、無限倍率の関係を図 28 に示す。燃料棒ピッチが大きくなるに従って流動抵抗が減少することから、原子炉容器の高さは低くなり、無限倍率は増加傾向を示す。冷却材温度係数が十分負であり、原子炉容器高さを低くするという設計要求から燃料ピッチを 13.9mm とした。

以上の炉心諸条件の検討結果として、原子炉容器の最小高さは 11.1m となり、蒸気発生器の遮へい構造厚さ及び自然循環力に対する余裕等を考慮して、最終的に原子炉容器高さを 12m とした。さらに、原子炉容器の上蓋は内圧が低いこと、現行 PWR 上蓋での種々のクラック発生の現実的な問題を考慮して平板状にすることとした。なお、上蓋が平板上である原子炉としては、前述のハルデン炉やロシアの KLT-40 等の例があり、前者は MR-100G と圧力、温度条件が似ているが、後者は一般的の発電炉の条件である。

5. 6. 2 原子炉格納容器

原子炉格納容器は、大深度地下空洞内に設置する中で単体の機器として最大であり、地下空洞の大きさだけでなく、地上から地下空洞に至るアクセストンネルの寸法への影響も大きく、そのことは当然建設コストへの影響が大きい。そのため、原子炉格納容器は前述の事故時の放熱機能維持だけでなく、最適な寸法あるいは適切な分割方法を採用する設計も適時に必要になる。

原子炉格納容の最大外径はアクセス道路の幅を考えて車 2 車線分のトンネルの直径を想定した。これは、原子炉システムの要件の一つである、建設場所の自由度を確保するためでもある。そのため、大深度地下空洞に機器を搬入する方法として、地上から直接搬入する場合と、自動車用地下トンネルを利用して搬入することを想定したことによる。その結果、原子炉格納容器は大深度地下空洞への搬入を可能にする寸法として、最大部の外径を 8.5m とした。事故時に原子炉容器を冠水し除熱することを考慮して、原子炉格納容器の高さは 21.8m と概算した。さらに、地下空洞の高さはできる限り制限することとし、原子炉格納容器は地下トンネル、機器搬入口を横向きで地下空洞に運び込み、所定の位置に設置するために本体を地下空洞内で回転できることを考慮して、原子炉格納容器は高さ 16.6m の位置で 2 分割し、ここにフランジ部を設ける構造とした。

原子炉格納容器は、原子炉運転終了後には原子炉本体の保管容器として利用することを考えている。すなわち、保管場所は補助空洞内あるいは、別途地下空洞等を構築することとし、運転終了後に原子炉容器及び原子炉格納容器を地上部へ持ち出さないことを想定している。そのため、運転終了後の原子炉は、放熱冷却のため原子炉容器と原子炉格納容器の間隙に水を張り、分割用フランジ部に格納容器の蓋をセットし保管する。またフランジ部より上部の蓄圧水タンク部分は原子炉運転終了後には不要となり、原則として放射化されていないので空洞外に持ち出すことは可能と考えている。

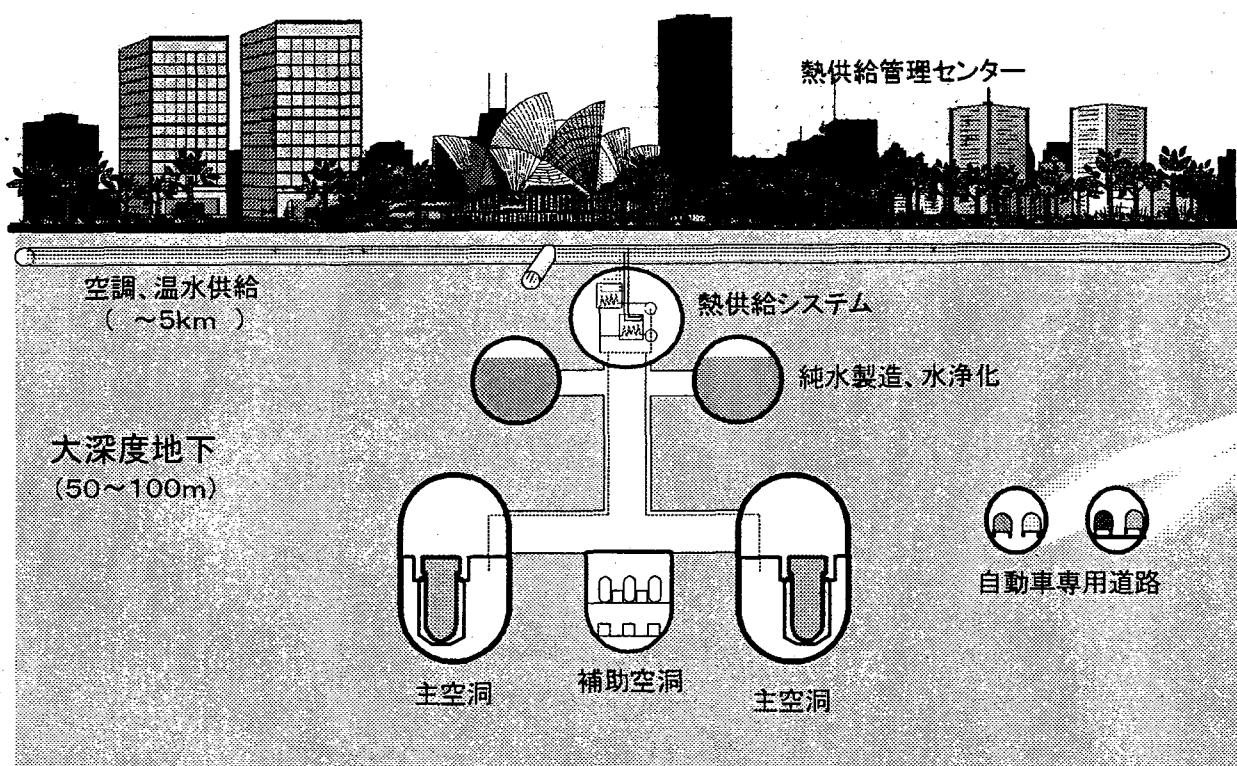


図 17 大深度地下を利用した地域熱供給システムの想像図

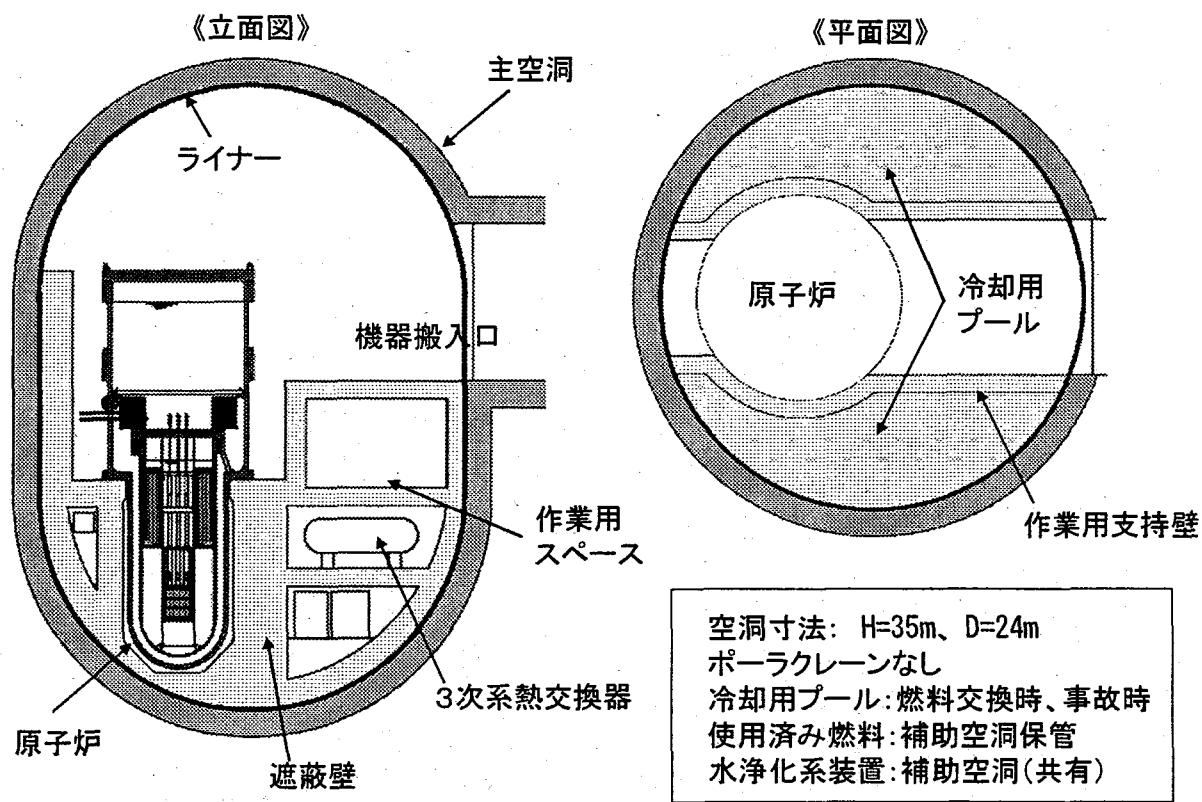


図 18 小型原子炉 MR-100G の大深度地下空洞内における主要機器の配置状況

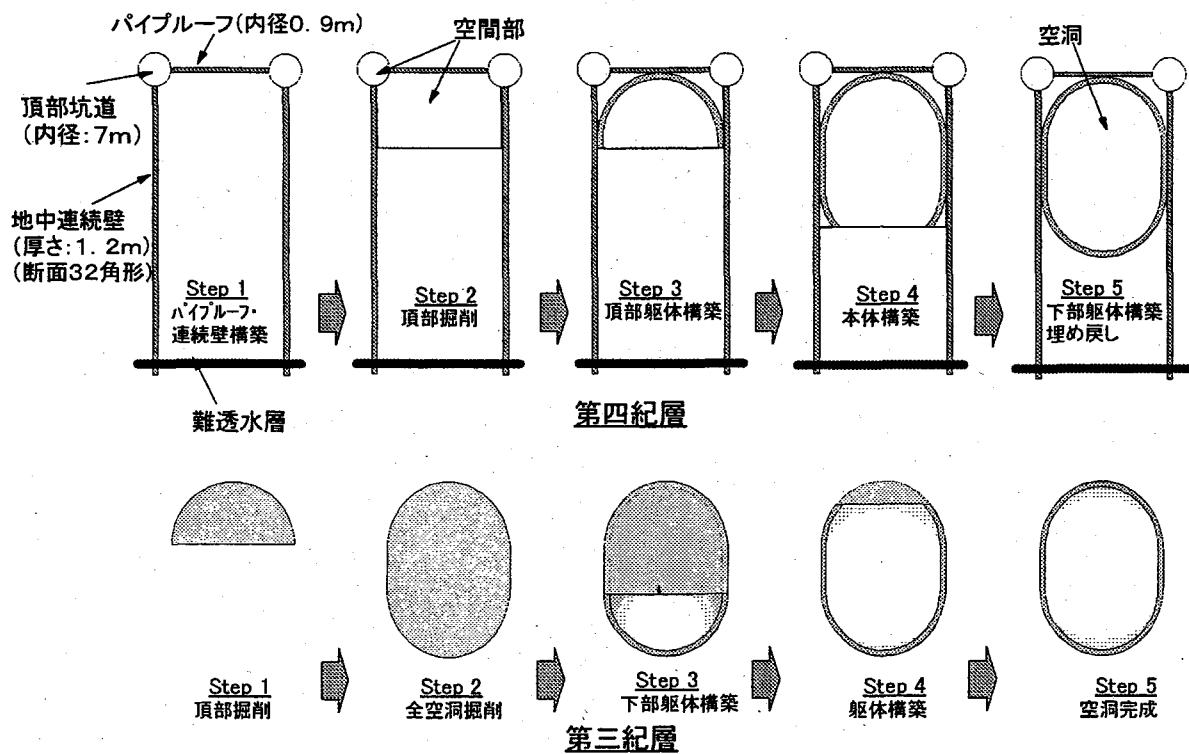


図 19 大深度地下に空洞を建設する工事手順の第四紀層と第三紀層の比較

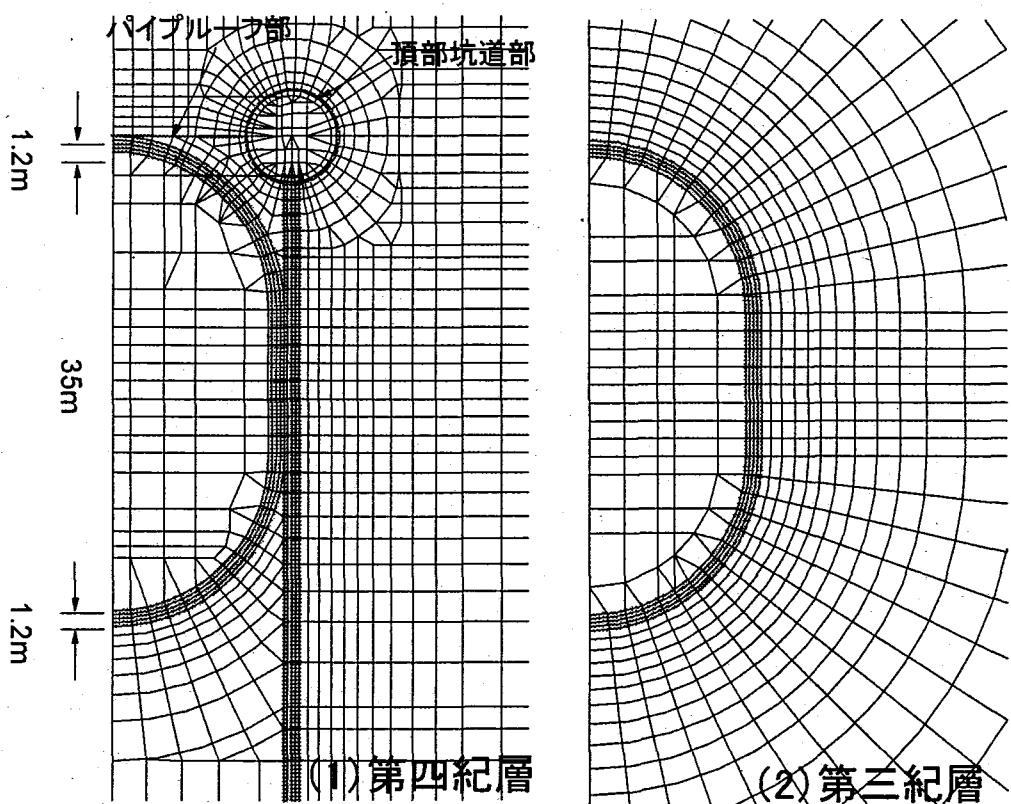


図 20 大深度地下空洞の安定性解析に用いたメッシュ形状

表3 大深度地下空洞の安定性解析に用いた地盤の力学特性

	第四紀層	第三紀層
密度 g/cm ³	1.90	1.85
弾性係数 MPa	100	300
ポアソン比	0.350	0.300
せん断強度 MPa	0.100	1.00
内部摩擦角 °	35.0	15.0

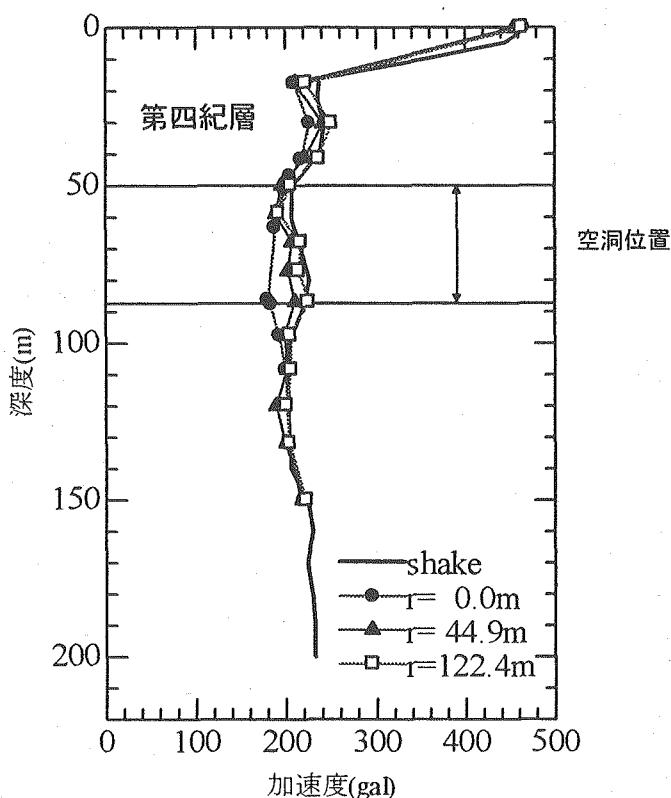
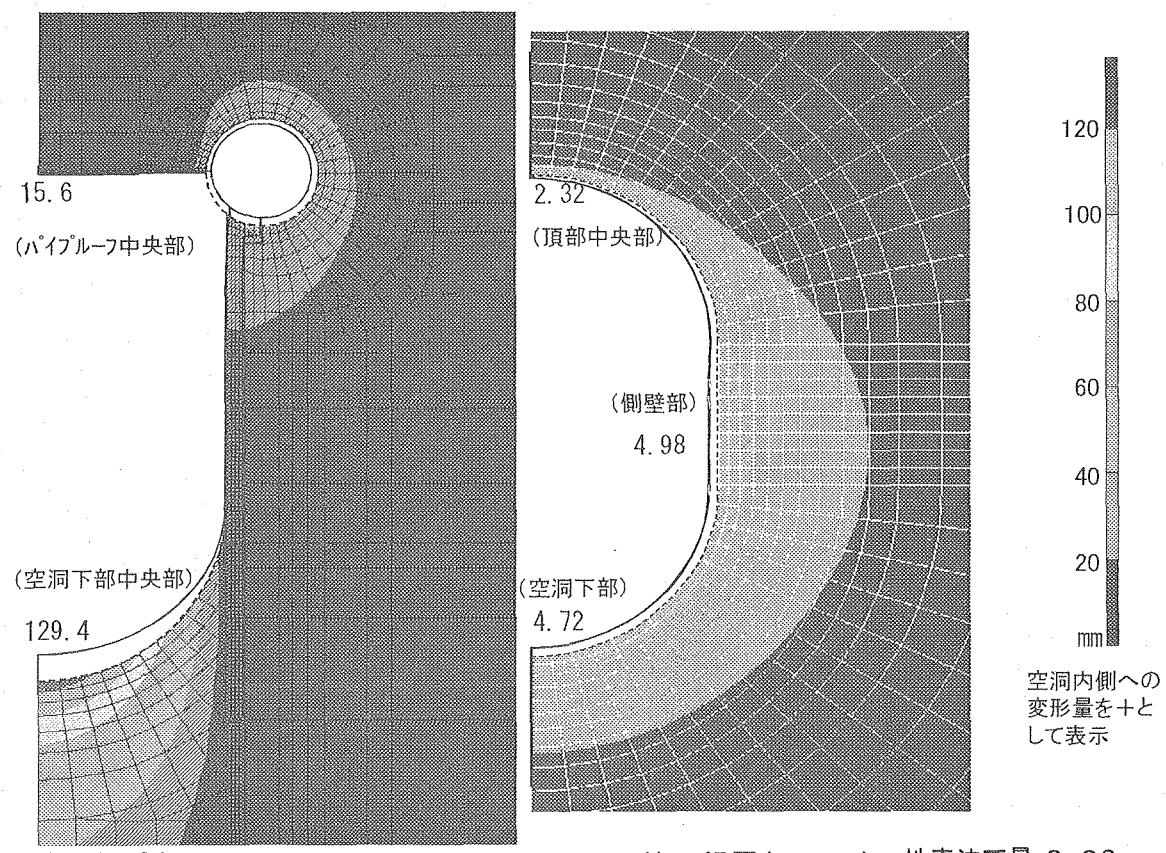


図22 大深度地下空洞における
第四紀層の耐震解析結果の例



a) 第四紀層(Step 5) 地表沈下量: 4.5mm b) 第三紀層(Step 2) 地表沈下量: 0.06mm

図21 大深度地下空洞の安定性解析の第四紀層と第三紀層の解析結果の例

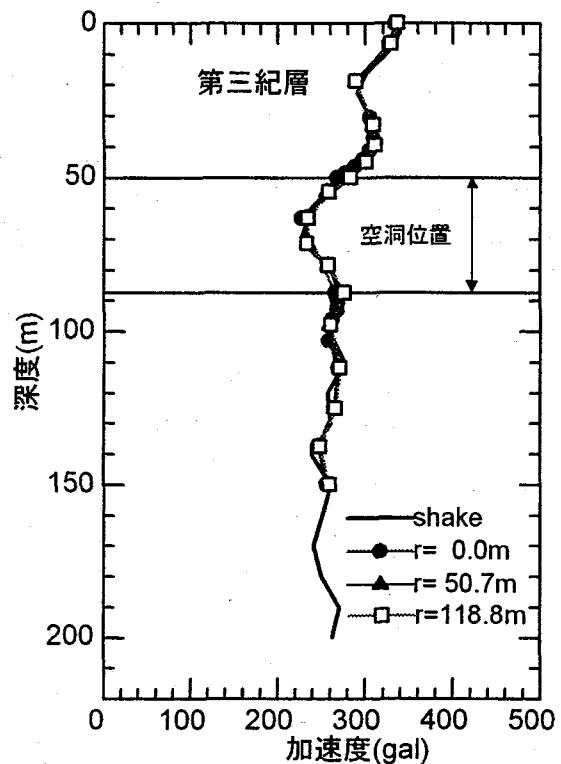


図 23 大深度地下空洞における
第三紀層の耐震解析結果の例

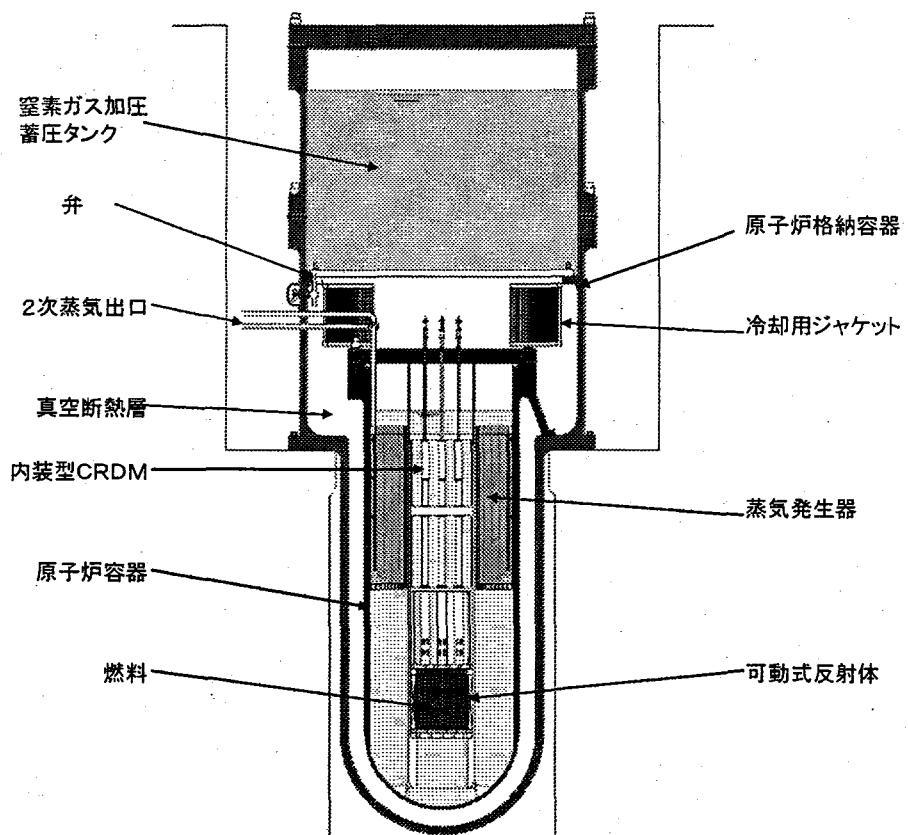


図 24 小型原子炉 MR-100G の主要部分の概念

表4 地域熱供給用小型原子炉 MR-100G の主要仕様

立 地 方 式		都市大深度地下
原 子 炉	熱 出 力 (MWt)	100
	形 式	一体型
一 次 系	加压方式	自己加压方式
	冷却方式	自然循環方式
	压 力 (MPa)	3
	炉心出口温度 (°C)	233
二 次 系	压 力 (MPa)	0.9
	出口温度 (°C)	185
	蒸気発生器	直管式 (管側: 1次水)
炉 心	寿 命 (年)	~8 (1バッチ)
	燃 燃 度 (GWd/t)	23
	集合体数 (体)	37
	燃 料	UO ₂
	燃料棒本数 (本)	9805
	燃料棒ピッチ (mm)	13.9
	燃料棒径 (%)	9.5
	濃 縮 度 (%)	4.3
	等価直径 (mm)	1622
	有効高さ (mm)	1502
制 御 棒	駆動装置 (体)	原子炉容器内装型
	駆動装置数	21
格 納 容 器	形 式	サイト固定式
	特 徵	真空断熱方式

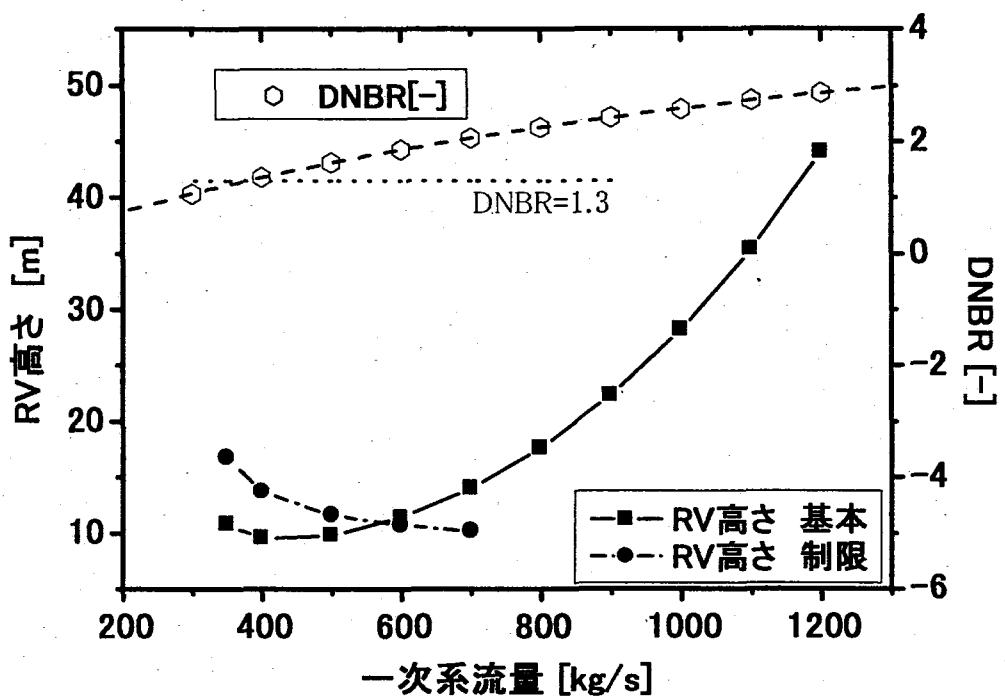


図 25 小型原子炉 MR-100G の原子炉容器高さと一次系流量の関係

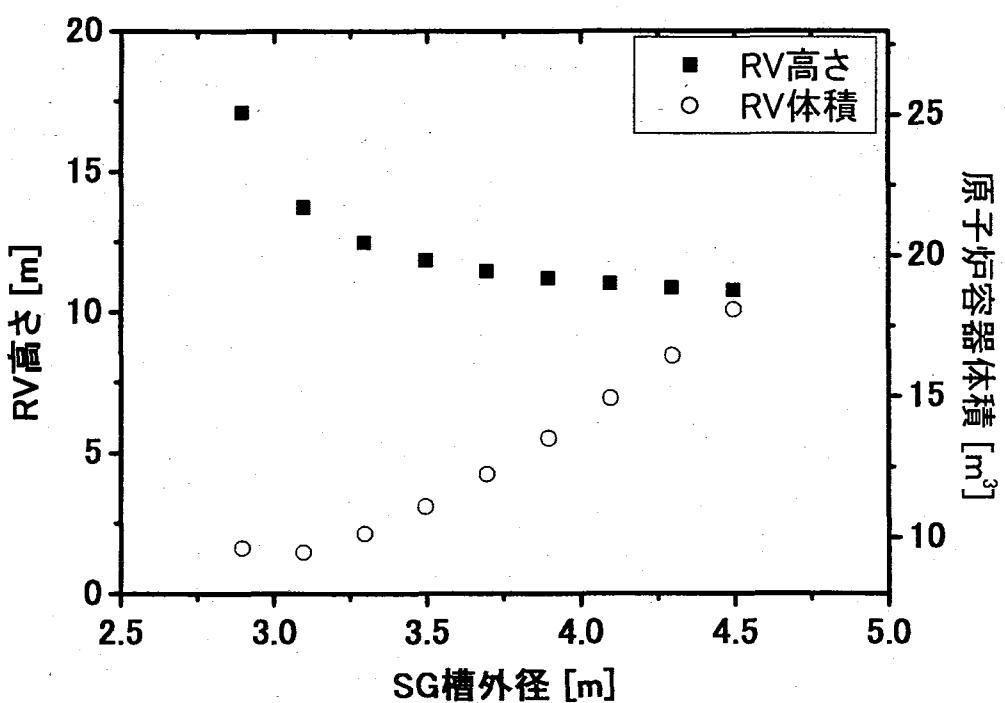


図 26 小型原子炉 MR-100G の原子炉容器高さと蒸気発生器の外径の関係

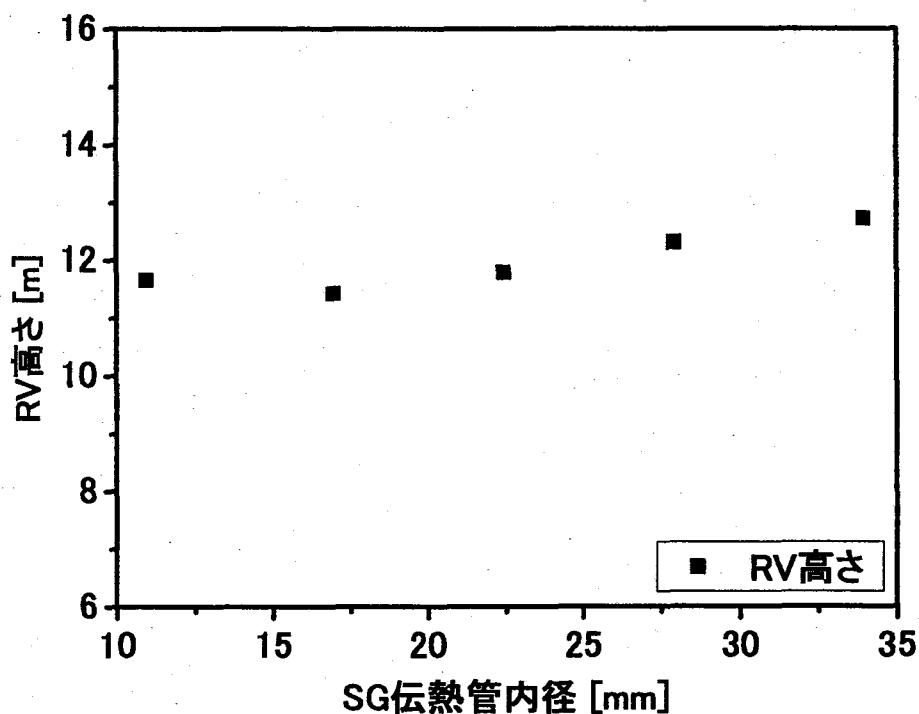


図 27 小型原子炉 MR-100G の原子炉容器高さと蒸気発生器の内径の関係

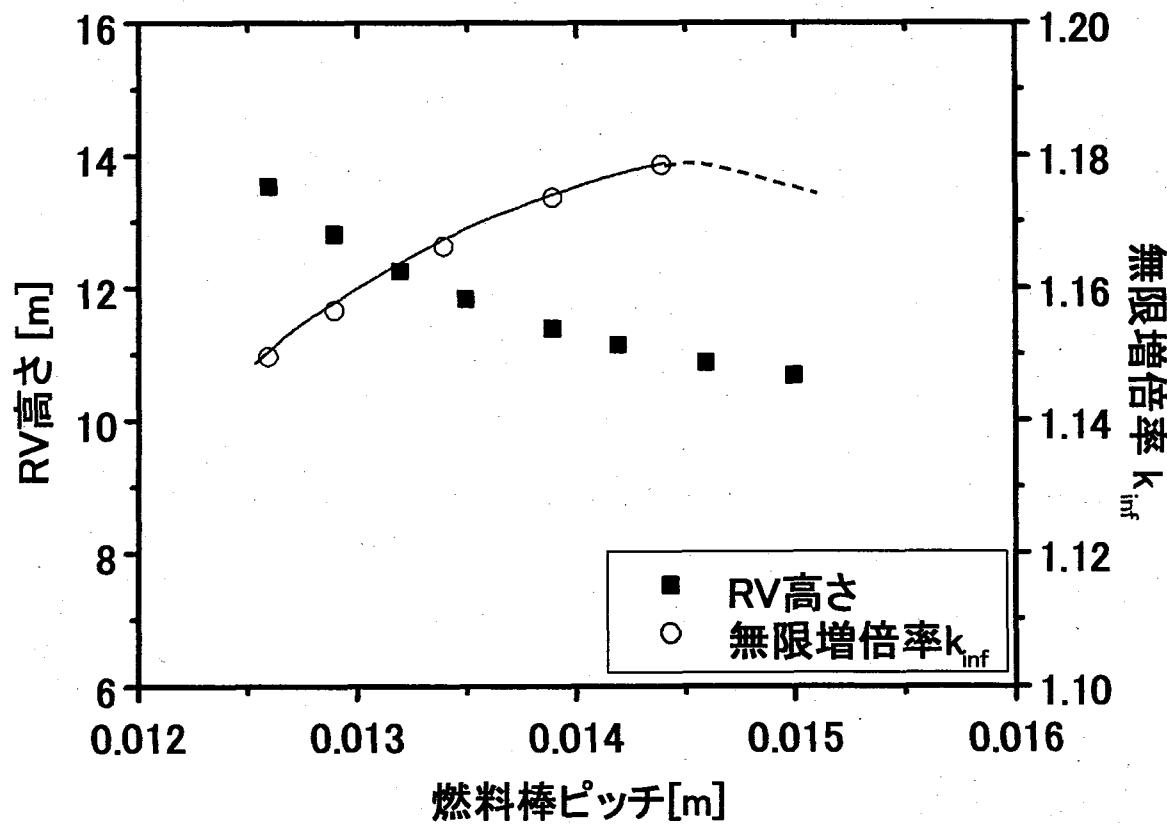


図 28 小型原子炉 MR-100G の原子炉容器高さと燃料棒ピッチの関係

6. 経済性の検討

地域熱供給システムの経済性評価では、熱源プラント、蓄熱槽システム類、燃料、各種構築物、冷凍機、供給用配管類等多くの検討が必要となるが、ここでは、熱源を第四紀層立地、第三紀層立地の原子力及び天然ガスボイラーの計3ケースについて比較検討した。検討において熱供給の共通部分、例えば吸式冷凍機、供給配管類、事務所等は評価の対象外とし、経費算出に際しては、天然ガスの場合にはガスボイラー方式を採用し、熱源プラント建設費、空洞建設費及び燃料費に着目したコスト試算を試みた。各ケースのコスト計算において、自己資金はゼロとし、資金は全て借入とし、借り入れ条件は金利3%、返済期間を16年とした。ただし、ここで記述する金額は天然ガスボイラーと原子力プラントの比較検討を主眼としたものであり、個々の金額で示した数値そのものにはそれ程の意味を持っていないことを補記する。

6. 1 原子炉プラントを利用する場合の分析

6. 1. 1 原子炉プラントのコスト

仮想都市の地域熱供給の熱源に原子炉を利用する場合には、熱出力100MWtの原子炉が2基必要であることは前述のとおりである。原子炉本体費用の概算は、110万kW級発電所が約5,000億円²⁴⁾とし、原子炉本体等の機械装置類が全体の60%と仮定した。また、原子炉の機械装置類については系統ごとに例えば設計、素材購入、加工、機器据付、試運転、調整等の単価を決め、総経費を算出した。一方、スケール係数に関してはDOE報告書²⁵⁾等を参考にして、原子炉及び付属設備については0.6とした。さらに、量産効果については電力中央研究所報告書²⁶⁾に示された式を参考にして、次の習熟のスロープを仮定して求めた。

- ①製作加工費 : 習熟のスロープ 85~90%
- ②試運転及び調整費 : 90%
- ③運搬費及び据付費 : 90%
- ④設計費 : 2基目以降は図面管理費
- ⑤素材費 : 習熟効果はなし

基本設計段階の同出力規模のMRX（日本原子力研究所で開発した改良船用炉）についての設備費計算方法²⁷⁾に準じ、本地域熱供給用原子炉MR-100Gの設備費を概算し、原子炉は1基目が195億円、10基目で145億円と算出し、本比較検討では145億円/基として計算を試みた。なお、原子炉の耐用年数はガスボイラーと同じ期間の40年と計算した。原子力の燃料費については、濃縮度、加工費、本数等から1基分16.8億円と概算し、年間負荷率25%で20年間の燃焼が可能であるとして試算した。

6. 1. 2 大深度地下空洞のコスト

大都市の大深度地下を利用することから、地下空洞建設コストを第四紀層及び第三紀層に地下空洞を構築することのコスト比較を行った。ここでの比較は、第三紀層での地下空洞の全建設費を100とした場合のシールド工事、空洞掘削工事、パイプルーフ工事、連続壁工事等の工事費の

比較を図 29 に示す。第四紀層と第三紀層の建設方法で述べたように、第三紀層の場合にはシールド工事、パイプルーフ工事及び連続壁工事等の仮設構築物の建設がなくなるため、第四紀層の建設費は第三紀層の場合に比べ約 3 倍となっている。地域熱供給システムではこの地下空洞が最低でも 2 基、さらに使用済み燃料置き場等の補助空洞の 1 基が必要となるが、ここでは補助空洞等の建設費を主空洞本体の建設費の 1/2 として概算した。

6. 2 天然ガスボイラーを利用する場合の分析

現在、地域熱供給システムには液化天然ガス（LNG）を利用するシステムが多く、このような地域熱供給の現状、特に既に多くの地域熱供給のインフラが整備されていること、今後もその傾向が続くであろうこと等を考え、導入システム評価の比較対象として LNG のガスボイラーによる地域熱供給システムを想定した。

仮想都市における人口、世帯数等から年間熱負荷は 164.5 万 GJ/年と概算した。ガスボイラーは市販の 10MW 級のプラントを 20 基設置することとし、その経費を約 100 億円と概算した。一方、年間の天然ガス燃料費は空調用 A 契約 1 種（平成 13 年 4 月現在）換算で試算すると約 15.1 億円となる。また、ガスボイラーの耐用年数は 40 年とした。これらの条件設定により天然ガスボイラーによる 40 年間での燃料費は約 604 億円と概算されることから、プラント設置費用と燃料費の合計は約 704 億円と算出された。

天然ガスボイラーを熱源とする地域熱供給のコスト計算において、熱源の設置場所（空間）のコストが経費の計算に含まないこととしているが、建設費はビル全体の費用の一部であり、ビルの高さ、床面積等の大きさ、デザインや土地の価格等が建設経費に及ぼす影響には不確定な要因が多く、このことが結果的にはガスボイラー設置場所の建設費に影響が多いため本評価から除外した。さらに、天然ガスボイラー設置用のスペースに関しては一般的にはビルのテナント費用が必要となるが、ビルの所有者がプラントを設置し運営する場合も多いことから、ここでは原子炉システムにとって厳しい条件を設定することとし、プラント設置用のテナント費は経費として見積らないこととした。

6. 3 プラントシステムのコスト比較

第四紀層及び第三紀層の大深度地下空洞に設置する原子炉によるシステム、ビルの地下に設置する天然ガスボイラーによるシステムについて、運転期間を 1 年目、20 年目及び 40 年目における各システムの累積経費を比較した結果を表 5 に示す。コスト比較を分かり易くするためにガスボイラーによる 40 年運転の累積費用を 100 として項目のコストを比較した。1 年目では、原子力の累積はプラント建設費の安い天然ガスボイラー方式の累積経費の約 3~4 倍となる。20 年目の累積費用は天然ガスボイラー方式と第三紀層立地の原子力方式がほぼ同額となり、40 年目の累積経費では第三紀層の原子力の場合が天然ガスボイラー場合の 67%、第四紀層の原子力の場合でも 82% となる。これらの数値をグラフの上で連続的に見ると第三紀層の原子力方式の場合は 22 年で、第四紀層の原子力方式の場合は 29 年でガスボイラーの場合よりコスト的に優位になることが分かった。これらの概算結果から、原子力方式の場合には、初期の建設費が高いものの燃料費が低く抑えられるために長期運転を想定すれば、天然ガスボイラー方式に対抗できることが知

られる。

なお、天然ガスは LNG として輸入されており、この現地での液化費用、運搬費用等が高額なため原子力プラントとの比較検討の対象となり得るが、現在サハリン、中部ロシア等から天然ガスパイプラインの建設計画が進められており、これらの計画が実現すれば天然ガスとして輸入されコスト的な利点が大きくなることからその場合には本検討のベースを見直す必要があることを付記する。

以上、仮想都市を想定した地域熱供給システムを検討するとともに、熱源として大深度地下を利用した原子力による場合と、天然ガスボイラーによる場合についての経済性を検討し、次のような結論を得た。

- ①仮想都市では、40年後には人口が減少するが世帯数の減少量が少ないために、結果として必要なエネルギー変化は少ない。そのために建設した初期のプラントは 40 年後においてもシステム容量が過不足なく利用できることが分かった。また、設備容量、年間負荷率は、終日運転、蓄熱システム等の導入により大幅に改善できることが分かった。さらに、カスケード利用方法を工夫することにより更に改善されることを検討した。
- ②原子炉本体を小型化するために、蒸気発生器を内蔵する一体型とし、制御棒駆動機構を内蔵するシステムを採用することにより、原子炉格納容器の大きさを高さ 22m、外径 8.5m の大きさに収めることができた。
- ③地下空洞建設では、第三紀層はもとより、都市で想定される第四紀層に立地する場合においても、地下空洞建設の成立性が確認できた。
- ④熱源として原子力を利用する場合の累積費用は運転が長期になるに従って、天然ガスボイラーより有利になることが分かった。

6. 4 原子炉システムの運転保守向上のための検討

地域熱供給用小型炉 MR-100G は年間負荷率が比較的低く、長期の連続運転が望ましい。また、原子炉制御には化学体積制御系を使用しないこと、熱供給用専用炉としての特徴を生かし運転操作を簡略化すること等、運転保守管理に配慮したシステム構成を想定している。しかし、長期連続運転に関しては、蓄圧水タンクの窒素ガス圧の低下、一次冷却水の不純物成分の増加、原子炉容器と原子炉格納容器の間隙部の真密度の低下に伴う断熱性能の劣化等の保守管理上の課題が想定され、それらの対策検討を要する。

本熱供給システムは独立したシステムの形態となっており、燃料交換時においても熱供給を続けられることを前提とするため、複数の原子炉による全体システムを構成しており、熱供給負荷の少ない例えば春、秋期に、個別的に原子炉を停止させ運転保守上の対策を行うことが可能である。前述の仮想都市での春・秋期の終日運転では、ほぼ 100MWt の熱量が必要で、ピーク時には約 120MWt 必要となるが、蓄熱システムを効率的に導入することによる改善が期待されることから春・秋期には原子炉 1 基を停止することは可能となる。また、保守・管理用機器類例えば水浄化系機器類は原子炉ごとに準備することなく、補助地下空洞に設置し、複数基の原子炉で共用す

ることができる。

一方、燃料交換に関して同様の考え方で対応することとし、使用済み燃料は補助地下空洞内に設ける使用済み燃料ピットに中間貯蔵する。年間負荷率 25%で 20 年間の燃焼が可能であり、1 バッチの燃料交換を予定しているため、仮に 60 年間の熱供給を想定すると、その間に 1 原子炉当たり 2 炉心分の使用済み燃料を保管する必要が生じ、仮想都市モデルで検討した 2 原子炉運転の例では、4 炉心分の使用済み燃料を保管する必要がある。例えば、80 年間の熱供給を想定しても、6 炉心分の保管となり、1 炉心 37 体の集合体構成であることから最大で 222 体の使用済み燃料集合体の保管が必要となる。

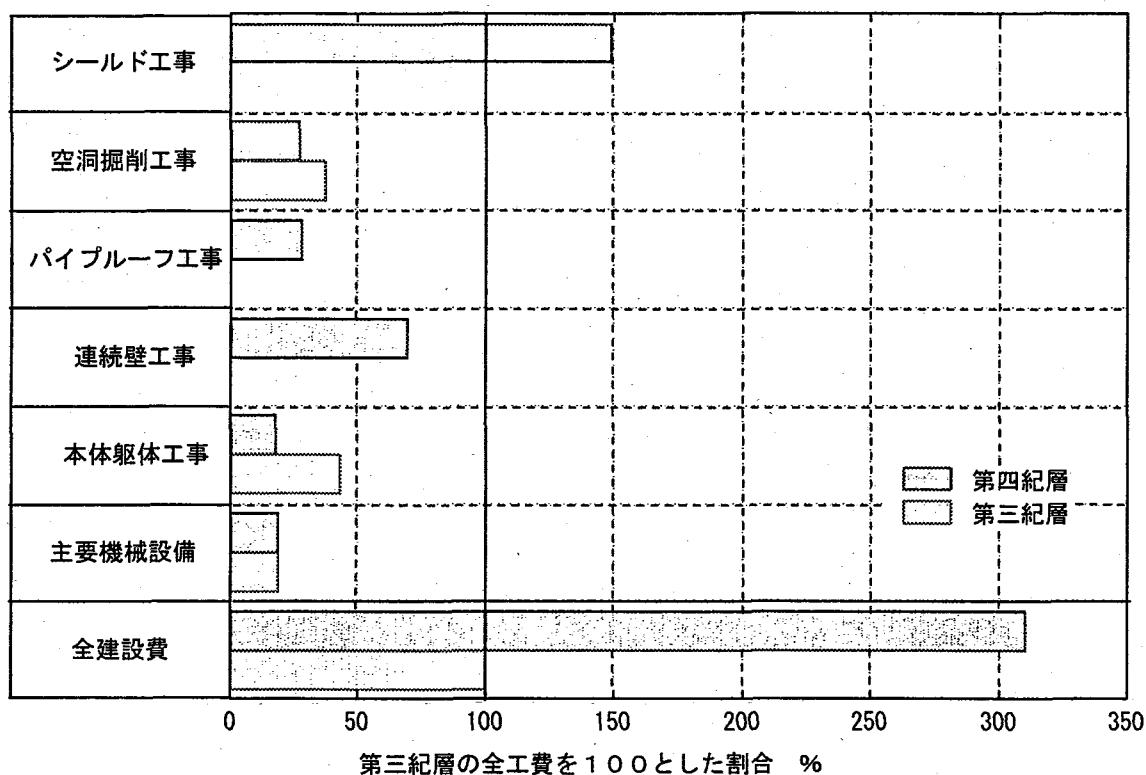


図 29 大深度地下空洞建設における各部別建設コストの比較

表 5 大深度地下空洞を利用した運転期間中の累積経費の変化

運転 期間 (年)	経費項目	熱供給方式					
		原子力			ガスボイラー		
		第四紀層		第三紀層	ビルの地階		
1	空洞 等	21	小計 67	7	小計 53	—	小計 16
	熱源設備	41		41		14	
	燃 料	5		5		2	
20	空洞 等	21	小計 72	7	小計 58	—	小計 57
	熱源設備	41		41		14	
	燃 料	10		10		43	
40	空洞 等	21	小計 82	7	小計 67	—	小計 100
	熱源施設	41		41		14	
	燃 料	19		19		86	

7. 実用化に向けた更なる検討課題

7. 1 社会受容性の向上

前述のように大深度地下を利用する地域熱供給小型炉システムは、現在の都市が抱える大きな問題を解決する可能性を持っているが、いずれにしても、そこの住民が受け入れる社会受容性が最大のポイントとなる。ポイントを支配するものはやはり原子炉システムの安全への信頼である。信頼性はとくに個人的、情緒的な要因に左右される場合が多いため、客観的な評価が必要であり、そのような工学的な評価としてリスク評価がある。この手法は本報告で提唱するシステムのリスクを評価し、リスクが大きく評価される場合にあっては、システムのどこを改良するとリスクがどのように改善されるか等の検討が可能である。原子力分野ではすでにリスク評価としては、確率論的安全評価いわゆる PSA が導入されているため、以下に PSA の概要等について述べる。

商業用原子力発電所の PSA の報告書としては、NUREG-1150²⁸⁾がその代表として発表されている。この報告書では、5 つの原子力発電所における苛酷事故によるリスクが報告されている。内的要因、もしくは外的要因による事故を取り上げ、これに起因した炉心損傷事故の頻度、格納容器の性能、放射性物質の放出と外部への影響、およびリスクについての情報が示されている。

公衆の安全という観点でリスク評価を実施する場合は、シビアアクシデントを解析の対象とし、その起因事象を設定し、予め設けられているシステムの安全機能がどのように働いたかの組合せを考慮した、イベント・ツリー等の手法を用いて事故シーケンスの定量的評価を行う。そのため、この方法ではシステムの安全機能の動作する確率、あるいは事故シーケンスの発生頻度等が必要になる。さらに炉心損傷に至る事故シーケンスにおいては、格納容器イベント・ツリーによる各事故シーケンスの発生頻度、事故の進展と事故状態下での核分裂生成物の放出・移行挙動を解析し、核分裂生成物の環境への放出量、ソースタームを評価する。最終的に大気中拡散や食物連鎖等による環境中の放射能移行解析を行って公衆の被ばく線量を計算し、公衆のリスクを求めるこことになる。さらに、大深度地下の利用を想定する本システムでは、地震 PSA による検討も重要な要素となる。

一方、経済性との関連においてもリスク情報に基づいた設備保全が既に導入され、RBI/RBM(Risk Based Inspection / Maintenance)といった手法がある。この手法は、リスクを評価し、その大きさを指標にメンテナンスの優先順位を付けることで、無駄な検査を省略することができるという合理性をもっている。保全の必要性の指標としてリスクを用いることにより、保全を必要とする箇所の優先順位が明確になり、低コストで信頼性の高い保全が可能となることから電力を始め国内外の石油化学会社等で導入されている。

確率論的安全評価の解析体系に関しては前述したとおりであるが、本システムに適用する場合には、

- 実機が存在しない
- 詳細なスペックが設定されていない

等の理由から、詳細な解析は現段階では不可能であり、今後の社会受容性を定量的かつ分かりやすくするための手法として大きな検討課題である。

7. 2 地下水の利用

前述のように海外の岩盤空洞を利用した地下式原子炉の例では、運転中はもとより、運転終了後においても、地下水による課題が大きい。

小型原子炉 MR-100G を利用した、大深度地下空洞の場合に設置する可能性の高い第四紀層立地では、建設時の仮設構造物を運転開始後には地下水対策に流用することが考えられる。また、事故時のヒートシンクとしての地下水の利用も検討に値する。その場合、地下水の挙動、放熱されたエネルギーの拡がり、あるいはそれに伴う周辺への影響に関する検討・評価も必要となり、ここでも周辺地域住民の理解が得られる技術的な説明が必要である。

7. 3 炉心の改良

地域熱供給システムは温水、冷水を供給し、利用者側で希望の温度に調整すること、原子炉と利用者間の距離が長いこと等の理由から、原子炉の出力変動は利用者側ではそれほど障害にはならず、その点では、発電用原子炉の出力変動および系統との関係に比して管理が容易である。一方、本システムの原子炉は自己加圧方式による自然循環炉であり、循環ポンプを持たない設計となっており、原子炉制御のツールは制御棒だけであり、出力変動への自由度が大きい特性を利用するなどを検討している。それは、炉心温度による自己制御機能を利用する事であり、制御駆動機構、制御棒の基数を減らし、運転制御の簡素ばかりでなく、建設コスト低減、保守管理の軽減につながることが期待される。

熱供給ラインの長さ、供給量、供給速度等を検討するためには、地域熱供給の具体化が必要であるが、供給ラインの断熱方式等により変動要因も多く、許容される利用者側の熱変動、原子炉の出力変動およびそれに伴う温度制御幅についての解析が必要であり、制御棒駆動機構の削減可能な本数を明らかにする必要がある。

8. あとがき

原子力の発電以外の利用拡充を目指した検討の結果として、小型原子炉を地域熱供給システムへ利用することを提案した。小型炉システム研究は、舶用炉の研究開発に端を発しており、それは原子力船「むつ」の開発から始まり、高速コンテナ一船の需要到来を念頭に、舶用原子炉として熱出力 100 MW の MR X の設計を行った。本報告での地域熱供給用小型炉はこの MR X をベースとし、地域熱供給に必要な特殊性を加味した設計となっている。舶用原子炉としては観測艇用の SCR の設計も進めた。これは熱出力 1 MW 程度であり、海中自航式の海洋調査船用の原子炉である。本報告では割愛したが、この熱出力 1 MW の原子炉をベースとしたビルの地階に設置するカートリッジ式の超小型熱供給炉 MR-1G の設計検討も進めた。

地域熱供給用小型原子炉あるいはビル熱供給用のカートリッジ式超小型原子炉も出口温度、圧力ともに既存の発電炉より下げた設計となっており、良好な熱媒体の開発などにより吸収式冷凍機の温度条件を下げる事が可能となれば、もっと設計条件を下げる事が可能であり、原子炉に伴うリスクばかりでなく、それにともなう経済的なメリットも飛躍的に改善される。しかし、その場合には原子炉自体の新規性、革新性は少なくなるため、原子炉の研究開発的な要素も少な

くなり、既存技術で十分達成できるものと考えられ、むしろ、これらのシステムの理解を得るには、実用化することにより実体から便利さを経験的に甘受できるシステムがあればとの思いは強い。

最後に、原子炉を利用した熱供給用システムの研究に対して、各種の会合等でプレゼンテーションする機会を得られたばかりでなく、多くの貴重なコメントを頂き、システム検討に大変有益であった。関係者に謝意を表したい。

参考文献

- 1) World Urbanization Prospects(The 2001 Revision) ESA/P/WP.173 (2002)
- 2) 「21世紀の国土のグランドデザイン」国土庁(1998)
- 3) 「エネルギー・経済統計要覧」エネルギー経済研究所(1999)
- 4) 「熱供給事業便覧」社団法人 日本熱供給事業協会編 (2000)
- 5) 例えば 地域暖房炉(熱供給炉) 原子力百科事典(ATMICA)
- 6) 例えば 離島振興法
- 7) 「原子力エネルギーの外部性」研究専門委員会報告 日本原子力学会 2005春の大会
- 8) 「東京都環境基本計画書」 東京都 (2002)
- 9) 例えば 「気候変動監視レポート」 気象庁 (2003)
- 10) 例えば "Three-dimensional Structure of an Urban Atmosphere, -- Interaction between Pollutants Behavior and Heat Island", T.S.Saito et.al ,International Conference on Urban Climate, Planning and Buildings, Kyoto, (1989), 1 - 10
- 11) 「新編 日本被害地震総覧」 宇佐美龍夫著 東京大学出版会 (1995 改訂)
- 12) 「東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書」東京都防災会議 (1997)
- 13) 「首都直下地震対策専門調査会事務局説明資料」(第13回中央防災会議) 内閣府 (平成16年12月15日開催) (2004)
- 14) 例えば「コジエネレーションハンドブック」早川一也、中根 滋 監修、井上書院
- 15) 例えば「都市経済学の基礎」佐々木公明、文 世一 著、有斐閣出版
- 16) 「平成10年人口動態統計」(厚生行政基本統計表) 統計情報部
- 17) 「日本の世帯数の将来推計:全国推計」1998年10月 (国立社会保障・人口問題研究所)
- 18) 「冷暖房熱負荷簡易計算法」 空気調和・衛生工学会規格 HASS112
- 19) 「設計用最大熱負荷計算法」 空気調和・衛生工学会
- 20) 「蓄熱式空調システム 基礎と応用」 空気調和・衛生工学会
- 21) 「地域熱供給システムを利用する超小型原子炉の出力規模に関する検討」高橋、楠、中島、 JAER-Tech 2003-052 (2003)
- 22) 例えば「建築基礎構造設計指針」日本建築学会
- 23) 「伝熱工学資料改訂第4版」、日本機械学会、(1986)
- 24) 「中小型軽水炉開発調査報告書(中小型軽水炉の利用分野に関する調査及び中小型軽水炉の立地に関する調査)」 日本原子力産業会議 (1982)
- 25) 「電源開発の概要 その計画と基礎資料 平成8年度」通商産業省資源エネルギー庁公益

事業部、平成 8 年 10 月(1996)

- 26) "Nuclear Energy Cost Data Base, A Reference Data Base for Nuclear and Coal-fired Power plant Power Generation Cost Analysis" DOE/NE-0078, December (1986)
- 27) 「モジュール型原子炉の経済性」、山地憲治、電力中央研究所報告 584009、昭和 60 年 5 月(1985)
- 28) "Design Study of advanced integral-type marine reactor MRX" , T.Kusunoki et.al, Nuclear Engineering and Design, 201 p.155-175 (2000)
- 29) "Severe Accident risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants," USNRC, NUREG-1150, (1990)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ボアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	= 4.184 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	= 4.1855 J (15 °C)
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^6	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

社会受容性に優れた分散型小型炉システムの検討
—大深度地下を利用した地域熱供給小型炉システム—



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています