

# 新型転換炉(ATR)の開発

## Development of Fugen-HWR

明比 道夫\*・小堀 哲雄\*\*

Michio Akebi Tetsuo Kobori

### 1. ま え が き

昭和58年の暮も押し迫った12月26日、新型転換炉(略称、ATR)開発の技術資料が動力炉・核燃料開発事業団(略称、動燃)から電源開発株式会社(略称、電発)に引き継がれた。このニュースは業界紙のトップを飾ったものの、一般紙では紙面の片隅にわずかに掲載されたに過ぎないので、気が付かれた方は少なかったようである。しかし、ATRの開発に従事してきた関係者一同にとって、この瞬間は16年にわたるナショナルプロジェクトの汗の結晶が次の段階へと展開する極めて感慨が深いものであった。

我が国初の国産動力炉として高速増殖炉(FBR)とともに開発してきたATRは、その開発の途上で昭和48年のオイルショックをはじめ種々の設計変更など多くの困難に遭遇しながら歩み続け、ようやく新しい展開ができるまでに漕ぎつけたのである。

最近、海外から「日本の切札」<sup>1)</sup>とか、「FBR実用化の先駆け」<sup>2)</sup>という評価を受けるようになった。我が国においても、ATR原型炉「ふげん」の順調な稼動に支えられてATRの評価が高まり、ATR実証炉の開発が一昨年8月正式に決定した<sup>3)</sup>。

ATRについては前に本誌に紹介したが<sup>4)</sup>、新しい情勢を背景にしながらATR開発の経緯や成果、ATRの特徴、開発の意義などについて述べてみたい。

### 2. ATRの構造と特長

#### 2.1 原子炉の構造

ATRは圧力管型重水減速沸騰軽水冷却炉と呼ばれ、核分裂で生れた高速中性子を熱中性子まで減速するために中性子吸収の少ない重水を使用し、高温高压の原子炉冷却材が常圧の減速材と分離した構造となっている。

\* 動力炉・核燃料開発事業団新型転換炉開発本部副本部長  
〒101 東京都港区赤坂1-9-13 三會堂ビル

\*\* 動力炉・核燃料開発事業団新型転換炉開発部主任研究員

る。発電所全体の構成は、沸騰軽水炉(BWR)と同じく原子炉で発生した蒸気をそのままタービンに導いて発電機を回すので、BWRに類似している。

原子炉の炉心はカランドリアと呼ばれる高さ4m、直径7~8mの練炭状の円筒容器で、練炭の孔に相当する部分にはジルコニウム合金製の内径約150mmのカランドリア管数百本が上下管板に拡管法で取り付け

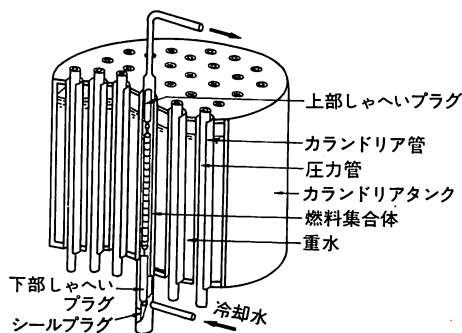


図-1 炉心構造図

られており、カランドリア全体に重水が満たされている(図-1)。

これらの各カランドリア管内には、ジルコニウム・ニオブ合金製の圧力管(内径118mm)がそれぞれ装着され、その中には燃料集合体が各々装荷される。燃料集合体は燃料棒を同心リング状に3層配列した構造をしており、「ふげん」の燃料集合体は28本の燃料棒、実証炉は36本の燃料棒で構成されている(図-2)。炉心の出力を調整する制御棒は上方からカランドリア内の常圧の重水中に挿入される。

燃料交換は、炉心下部より遠隔操作によって行われる。

#### 2.2 ATRの特徴

ATRは、減速材(重水)と冷却材(軽水)が分離していることから、次のような特徴がある。

(1) プルトニウムは炉の安定性を向上させる。

プルトニウムは冷却材ボイド反応度を負側に下げ、

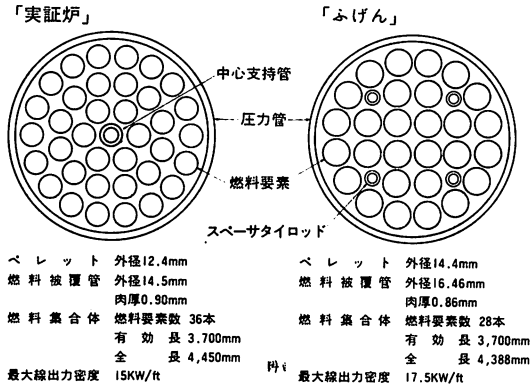


図-2 燃料断面図

炉の安定性と安全性の向上に寄与する。

(2) どんな燃料でも同じように制御できる。

制御棒が熱中性子の多い重水中に挿入されるので、プルトニウム燃料を利用する場合でもウラン燃料を利用する場合でも、制御棒効果は余り変わらない。

(3) 種々の燃料を容易に燃やせる。

使用済燃料を再処理して得られる減損ウランや天然ウランにプルトニウムを富化して使用する場合に、炉心の核特性を同一にするには、ウラン中の<sup>235</sup>U含有量と核分裂性プルトニウム量の和を一定にすればよい。

また、リサイクルした燃料から取り出した高次プルトニウムはリサイクルの回数や燃焼度によって核分裂性物質の含有率が異なるが、ATRは非核分裂性プルトニウムによる中性子の共鳴吸収の影響をほとんど受けないので、製造時に核分裂プルトニウムの量をわずかに増加させるだけでよい。

(4) 燃料集合体の出力分布を平坦化しやすい。

燃料集合体は図-2に示すように燃料棒が同心リング状に配列されており、熱中性子は周囲の重水中から燃料集合体に入ってくるので、外層リングの燃料棒とそれ以外の燃料棒の2通りの核分裂物質量を調整するだけで、燃料集合体の出力分布を平坦化できる。

### 2.3 ATRの役割と開発の意義

我が国は軽水炉—高速増殖炉の路線を原子力開発の基本にしており、当面軽水炉が主流を占めている。一方、エネルギー源の大部分を外国に頼らなければならない我が国にとって、エネルギーセキュリティの向上のためにはエネルギー資源の安定供給と自立性の向上が非常に重要である。

原子力委員会は、このような観点と前記のATRの特徴を考え、我が国におけるATRの役割を次のように示した<sup>5)</sup>。

「高速増殖炉の実用化までの間及びそれ以降においてもその導入量によっては相当量のプルトニウムの蓄積量が予想される。このため、プルトニウムを熱中性子炉の燃料として利用する。熱中性子炉としては、新型転換炉を発電体系に組み入れることができるよう開発を進め、さらに軽水炉によるプルトニウム利用を図る。」

「ふげん」はプルトニウム利用を主体とした世界唯一の熱中性子炉の発電プラントで、我が国が独自に開発を進めてきた炉型であって、同炉によるプルトニウム利用に関して核不拡散上国際的理解も進んできている<sup>4)</sup>、とも評価されている。

原子力委員会の新型転換炉実証炉評価検討専門部会は、1年半にわたる審議の結果、ATR開発の意義を次のように評価した<sup>6)</sup>。

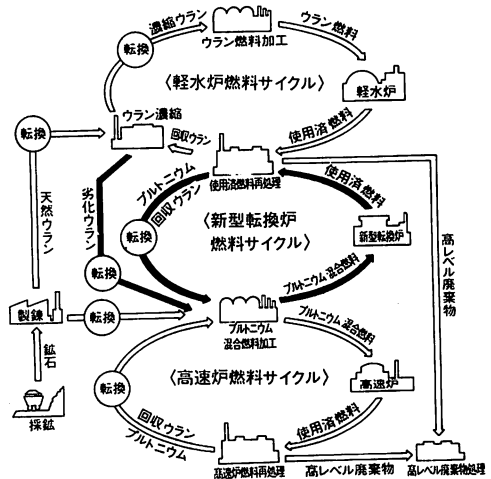


図-3 核燃料サイクル

- (1) プルトニウムの早期利用によって、天然ウラン所要量とウラン濃縮分離作業量を削減できる。
- (2) プルトニウム蓄積量を調整し、核物質管理上の経済的負担を軽減する。
- (3) プルトニウム燃料加工等核燃料サイクル産業化へのインセンティブとなる。
- (4) 我が国における再処理の商業化など核燃料サイクルの早期確立の必要性について国際的理解が得易い。
- (5) 原子力分野における自立性が向上し、我が国のエネルギーセキュリティの向上に寄与する。

### 3. 原型炉「ふげん」の開発

#### 3.1 開発の経緯<sup>7)</sup>

「ふげん」が我が国初の自主開発の国産動力炉とし

て設計検討が開始されたのは今から20年前の昭和38年である。日本原子力研究所では、原子力委員会が動力炉開発専門部会の審議にもとづいて決定した「天然ウランまたは微濃縮ウランを使用する重水減速型を対象とする」という基本方針のもとに、沸騰軽水、炭酸ガス、重水、有機材などの各種冷却材の重水炉について技術評価が1年余にわたって行われた。

昭和39年10月原子力委員会に設置された動力炉開発懇談会（略称、動懇）は、この技術評価に加えてさらに1年半にわたる検討作業と海外の動向調査を行った。原子力委員会はこの動懇の審議結果にもとづいて昭和41年5月動力炉開発の基本方針を内定し、ATRについては沸騰軽水冷却型を開発対象として、昭和40年代半ばに原型炉の建設に着手することになった。同年6月に動力炉開発実施計画の検討と策定のために発足した動力炉開発臨時推進本部における関係者の精力的な作業と国会の審議を経て、昭和42年10月開発の母体となる動燃が設立された。

動燃は昭和42年度に原型炉「ふげん」の第1次概念設計、昭和43年度から44年度にかけて電発及び日本原子力発電(株)の協力を得て第2次概念設計を実施し、「ふげん」の圧力管の間隔や本数など具体的構想を決めた後、昭和44年5月に設置された新型転換炉評価検討専門委員会によるチェックアンドレビューを受けた。政府はその答申によって昭和44年11月「ふげん」の設置とその開発計画を承認した。

昭和45年3月電気出力16万5千kWの「ふげん」の設置認可申請、同年11月認可、同年12月には福井県敦賀市で電発に施工管理を委託して建設が始まった。昭和47年5月原子炉建家工事着工、昭和48年6月原子炉格納容器据付完了、昭和49年11月から原子炉本体関係機器の据付開始、そして当初の予定より約3年半遅れて昭和53年3月臨界、1年間の起動試験を経て昭和54年3月本格運転を開始した。

### 3.2 運転実績及び成果

「ふげん」の開発は、我が国の原子力開発としては高速増殖炉とともに初めての自主開発による大型プロジェクトであった。人も資金も期間も限られた中で、自らの手で開発を進め、トラブルが起れば自らの手で解決するというのが自主開発である。

開発のリスクを避けるために既存の技術は極力利用しながら、炉心性能、安全性、燃料集合体及び圧力管集合体などについては実規模試験を行って設計の実証確認をすることなどを開発の基本方針として、茨城県

の動燃大洗工学センターに昭和44年度4基の実規模試験装置を設置した。

炉本体、燃料交換機、圧力管集合体などの重要機器は、まずそれぞれの機器の重要部を試作・試験し、その結果を反映しながら機器の設計・試作を行い、さらに試験を繰り返しながら必要な改良を施すなどによって重要機器のノウハウを確立することに努めてきた。

しかし、機器の設計や試作は決して順調とばかりはいえなかった。燃料の熱的限界値や炉心の冷却材ボイド反応度が実規模試験の結果、当初の予測と異なることがわかった。これに対して、燃料集合体のスペーサを軸方向に従来よりも密に配置して限界熱流束を向上させる、プルトニウム富化燃料の装荷量を増して冷却材ボイド反応度をゼロまたは負にする、など設計に工夫を要することもあった。

また、経済性向上のため、原子炉冷却系を4ループから2ループへ簡素化する、回転数3,600rpmの蒸気タービンを採用して小型化する、などの設計の合理化も行った。

以上のように、我が国の自主技術で設計・建設した「ふげん」は昭和54年3月に本格運転を開始して以来順調に稼動しており、昭和58年12月末までの総発電々力量は41億kWhに達し、この5年間の平均設備利用率は約60%である。この間にATRの設計に基因する特別な不具合事項は発生していない。

本格運転開始後これまでに280体の使用済燃料が原子炉から取り出された。このうち、120体はウラン・プルトニウム混合酸化物燃料であり、取り出した燃料集合体の最高燃焼度は約13,600Mwd/tであるが、1本の燃料棒も破損の徴候を示していない。

なお、昭和57年9月から58年2月に行った第3回定期検査中に装荷したウラン燃料体中3体には、動燃の人形峠事業所のウラン濃縮パイロットプラントで我が国独自の遠心分離法によって生産された濃縮ウランが初めて使用されており、その原料の一部には人形峠産の原石からの天然ウランも含まれている。これによって我が国の核燃料サイクルが一步前進したと言える<sup>8)</sup>。

### 3.3 ふげん開発と国産協力

現在、重水炉を開発している国は、加圧重水冷却型炉CANDU-PHWを次々と開発し12基が稼動中のカナダ、実験炉規模の沸騰軽水冷却炉CIRENE（電気出力4万kW）を昭和60年完成を目指して開発しているイタリア、及び我が国の3カ国である。イギリスは「ふげん」と同じ沸騰軽水冷却炉SGHWR（電気出力

10万kW)を昭和42年に運転開始したが、その後の情勢変化により重水炉開発を中止した。西独は压力容器型の加圧重水冷却炉MZFR(電気出力5万7千kW)を昭和40年に運転開始後、アルゼンチンに同型炉を2基輸出している。

昭和41年ATRの開発方針策定に際しては、開発炉型の評価、開発戦略及び計画などを固めるために、諸外国における重水炉の開発状況、将来計画などについて調査が行われた。「ふげん」開発の初期段階では開発期間の短縮と開発費の削減のために、昭和42年度～44年度にイギリスとカナダから炉心設計コードや圧力管集合体の設計など必要な技術情報を購入するとともに、制御棒効果の臨界実験をアメリカのサバンナリバー研究所に委託した。

我が国のATR開発実規模試験装置が整備されるに伴って国際協力が対等に行えるようになり、昭和46年より「ふげん」と同じ軽水沸騰冷却重水炉を開発している日本、イギリス、イタリア及びカナダの4カ国で技術情報交換会議(各国の頭文字と交換 Exchange のEをとってJUICE Meetingという)を開催するまでに発展した。さらに、イギリスの原子力公社と動燃との間ではSGHWRと「ふげん」の技術経験交換会議を行うようになった。

#### 4. ATR実証炉の開発

##### 4.1 開発の経緯<sup>7)</sup>

「ふげん」の原子炉格納容器の据付けが終了した昭和48年、実証炉の研究開発は「新型転換炉評価研究」として予算が認可され、その第1歩を踏み出した。

昭和49年には動燃内に新型転換炉評価研究専門委員会を設け、実証炉構想の基本方針の検討評価を行った。その成果に基づいて昭和50年度から昭和53年度にかけて、概念設計として電気出力60万kWの実証炉の炉本体構造の検討をはじめとして、プラント全体の設計検討に至るまでの設計研究を実施した。それは「ふげん」の設計・建設の経験と研究開発の成果を集大成して、具体的な実証炉の設計構想を提案するのが目的であった。

設計は単に原子炉本体ばかりでなくプラント設計上の基本条件についても、「ふげん」方式を大幅に変えた案について経済性、必要な研究開発と期間、「ふげん」の建設経験などの面から検討し、最終的には実証炉は「ふげん」方式を踏襲することとした。

こうした設計作業と並行して、昭和51年度以降大洗

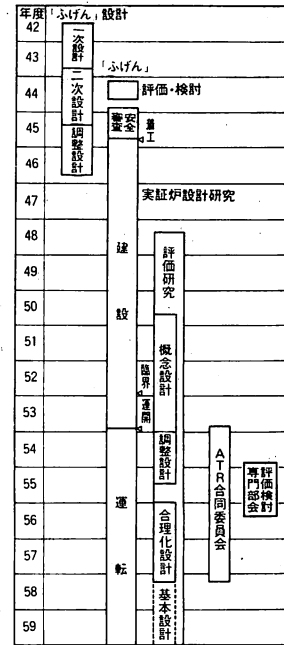


図-4 ATR開発の経緯

工学センターにおいて実証炉の炉心特性、安全性、燃料集合体などに関する実証試験を進めている。

「ふげん」の運転実績、実証炉の概念設計の成果及び軽水炉の経験などを反映しながら、昭和54年度及び55年度に「調整設計」の名称で実証炉プラントの全体設計を実施した。

昭和54年2月電気事業者と動燃の間にATR合同委員会が設置され、「ふげん」の実績及び実証炉の設計について4年余にわたって、安全性、運転信頼性、運転保守性及び経済性の観点から検討・審議を続けてきた。一方、昭和55年1月には原子力委員会に新型転換炉実証炉評価検討専門部会が設置され、実用化の意義、技術評価、経済性評価について審議が行われ、昭和56年8月に「実証炉を建設することは妥当である」旨の報告書<sup>8)</sup>が原子力委員会に提出された。

動燃はこの報告書とATR合同委員会の審議結果及び実証試験の成果を反映しながら、さらに経済性の向上を図りプラントとして整合性のとれた実証炉設計をまとめ上げるため、昭和56年度及び57年度に合理化設計を行い昭和58年6月に完了した。

こうした動きとは別に、昭和57年6月、実証炉の建設を官民協力して円滑に推進するため、関係者によるATR実証炉建設推進委員会が設置された。原子力委員会は、この委員会の協議に基づき昭和57年8月ATR

R 実証炉計画推進のための基本方針を次のとおり決定した<sup>3)</sup>。

- (1) 実証炉の建設・運転は、電気事業者及び動燃事業国の協力を得て電源開発㈱が行う。
- (2) 実証炉に必要な研究開発及びプルトニウム・ウラン混合酸化物燃料の加工は動燃事業団が行う。
- (3) 実証炉の発電原価については、極力その低減を図ることとし、官民協力して所要の措置を講じる。

動燃では、この基本方針に基づき、昭和58年2月発電との間に「相互協力基本協定」、同年12月「技術情報の管理に関する協定」を結び、冒頭に記した技術資料の引き継ぎを無事果すことができたのである。

#### 4.2 実証炉の設計

実証炉開発の目的は、「ふげん」から実用規模まで大容量化する際の技術的問題の実証と実用化段階の経済性の見通しを得ることである。

実証炉の設計研究では、「ふげん」及び軽水炉の経験を反映することを原則として、①安全性の確保、②運転信頼性の向上、③運転保守の容易化、④経済性の向上、の4項目を設計目標とし、さらに下記事項を設計の基本方針とした。

- (1) 電気出力は60万kWとする。
- (2) プルトニウムの利用を主体に設計する。
- (3) 重要な機器系統は「ふげん」方式を踏襲する。
- (4) 停止時燃料交換方式を採用する。

上記の設計目標及び基本方針のもとに実証炉の設計研究を進めてきたが、「ふげん」と実証炉設計が異なる点は次のとおりである。

##### (1) 燃焼度の向上

燃料サイクル費低減のため、平均燃焼度を「ふげん」の17,000MWd/tから30,000MWd/tへと向上させる。

##### (2) 燃料の平均出力の増大

炉心のプルトニウム富化度分布を調整して出力分布を平坦化し、燃料の平均出力を「ふげん」より約20%増大する。また、燃料棒直径を細径化して燃料集合体当りの燃料棒本数を28本から36本に変更し、燃料棒の単位長さ当りの最高出力を低減する。

##### (3) 重水ダンプスペースの削除

カランドリアタンの大型化を抑制するために、後備停止系としての重水ダンプ方式を取りやめ、その代わりにポイズン急速注入系を設置する(図-5)。

##### (4) 燃料交換方式の合理化

燃料移送方式を図-6に示すように水中台車方式へ変更するほか、1回当りの燃料取扱本数の倍増、燃料交

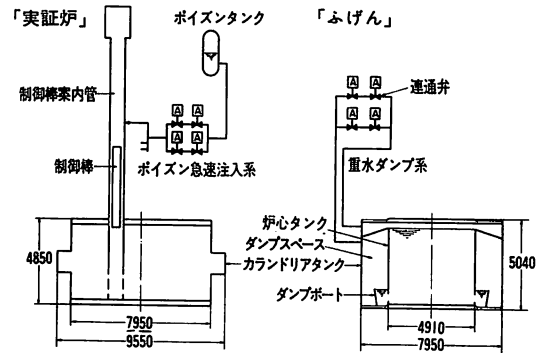


図-5 カランドリアタンク形状

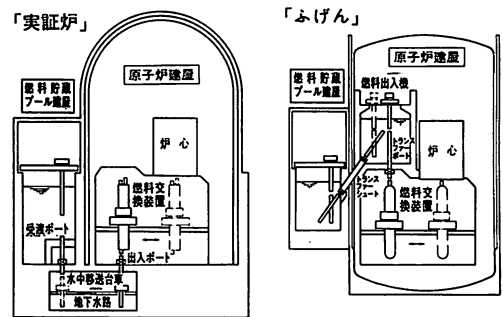


図-6 燃料交換方式

表1 主要諸元比較表

項目	ふげん	実証炉	実証炉 ふげん	備考
出力 発電機出力(MWe)	165	600	3.64	
炉 圧力管本数	224	648	2.89	圧力管本数21%削減
炉心 炉心等価直径(m)	4.05	6.95	1.72	炉心体積19%削減
燃 燃料棒本数	28	36	1.29	圧力管本数削減、最大線出力密度低下対策
料 平均燃焼度(MWd/t) (平衡炉心)	17,000	30,000	1.76	燃料サイクル費の低減に寄与
一冷却系 炉心冷却材流量(t/h)	7,600	22,600	2.97	流量19%低減
制御系 制御棒本数	49	93	1.90	本数48%削減
後備停止系	重水ダンプ	重水中急速ポイズン注入	-	ダンプスペース削減によるカランドリアタンク縮小
燃取料取 燃料交換方式	下方よりオンパワー交換可	下方よりオフパワー	-	信頼性向上

換機の移動速度増加、燃料交換時の燃料昇降速度の増大などによって燃料交換時間の短縮を図る。

「ふげん」と実証炉の主要諸元を表1に示す。

#### 4.3 実証炉のための研究開発

実証炉の設計は、「ふげん」の設計を踏襲しながら「ふげん」開発の実績及び経験、軽水炉の経験などを反映しており、主として確認あるいは実証を目的とする研究開発は必要であるが、その機能及び性能を実現できる見通しである<sup>6)</sup>、と考えられる。

表2に実証炉のための研究開発項目を示したが、これらの項目のほとんどは実証炉設計の妥当性を確認す

表2 実証炉のための主要な研究開発項目

区 分	項 目
1. 設 計 研 究	(1) 設計・運転コードの改良・整備 (2) 実証炉基本設計の検討 (研究開発の成果及び「ふげん」の実績の反映) (3) 燃料設計 (4) 新型転換炉設計の総合的評価検討 (安全審査指針等の適用法, 適切な安全裕度の設定法等)
2. 炉 心 性 能	(1) 核的性能実証試験 (2) 熱的性能実証試験
3. 安 全 性	(1) 工学的安全施設の炉心冷却性能実証試験 (2) 原子炉停止系の性能試験 (ポイズン急速注入系の性能及び地震時制御棒の挿入性) (3) 供用期間中検査装置の開発 (4) 配管漏洩検出器(安全監視系)等の開発
4. 部 品 ・ 機 器 試 作 開 発	(1) 計測制御系(ホウ酸濃度制御系, 破損燃料検出系等)の性能確認試験 (2) 圧力管集合体の試作及び健全性確認試験 (3) 炉心重要部品の実規模試験 (耐久性, 流動) (4) 燃料取扱装置の試作, 性能確認試験 (5) 運転保守・補修技術の開発 (6) 原子炉冷却系の水質管理, 腐食, 除染
5. 燃 料 材 料	(1) 燃料集合体の試作開発 (2) 燃料照射試験

るために行うものであり, 今後, ふげん発電所, 大洗工学センター及び東海事業所等において展開していくことになる。

## 5. 今後の展望

動燃における実証炉プラント全体設計は合理化設計をもって終了した。今後は電発が実証炉設計を引き継いで, 昭和58年度から60年度にかけて基本設計を行い, 昭和60年度後半に予定されている原子炉設置許可申請を目標に設計資料を整備していくとともに, 機器製作に必要な設計条件を確立していくことになっている。

既に電発では, 本州北端の大間町で立地環境調査を昨年8月より開始している。現在の工程では, 昭和63年着工, 昭和69年末運転開始の予定である。

動燃は, 今後電発と十分協議しながら基本設計に協力するとともに, 実証炉のための研究開発およびウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の開発を進めていくことになる。

## 6. むすび

ATR 実証炉の開発は, これまで動燃が実施してきた設計研究を集大成した技術資料を電発に引き継ぎ, 新たな段階に入った。

動燃は, 今まで蓄積した ATR に関する技術と知見を基に「ふげん」及び大洗工学センターの諸施設を活用しながら, 実証炉開発に寄与する所存である。関係各位の暖かい御指導と御支援をお願い申し上げる次第である。

## 参 考 文 献

- 1) Kramish, A.; Fugen: A. Mirror of Japan's Nuclear Policy, The Significance for the U.S. and INFCE, 米国エネルギー省委託調査報告, RDA-TR-19423-002 (Rev.), (1979).
- 2) IAEA; Press Summary of Plenary Session 5, 国際原子力経験会議, (1982).
- 3) 原子力委員会; 新型転換炉の実証炉計画の推進について, (1982).
- 4) 澤井定ほか; 新型転換炉開発の現状と展望, エネルギー・資源, 2巻, 5号, (1981), 407~413.
- 5) 原子力委員会; 原子力開発利用長期計画, (1982).
- 6) 原子力委員会; 新型転換炉実証炉評価検討専門部会報告書, (1981).
- 7) 動力炉・核燃料開発事業団; 動燃十年史, (1978), 233~294.
- 8) 動力炉・核燃料開発事業団; 報告と講演の会 予稿集, (1983).