



JP0050837

JAERI-Tech
2000-062



核変換実験施設の概念検討 (1) 核変換物理実験施設の概要

2000年9月

大井川 宏之・池田 裕二郎・佐々 敏信・明午 伸一郎
高野 秀機・辻本 和文・西原 健司

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）で複写による実費領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, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

核変換実験施設の概念検討
(1)核変換物理実験施設の概要

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究中心
大井川 宏之・池田 裕二郎・佐々 敏信・明午 伸一郎
高野 秀機・辻本 和文⁺・西原 健司⁺

(2000年8月25日受理)

原研-K E K大強度陽子加速器計画の一環として、加速器駆動未臨界システム(ADS)を用いた核変換技術の開発を目的とした「核変換実験施設」の検討を行っている。核変換実験施設は「核変換物理実験施設」と「核変換工学実験施設」で構成される。この内、核変換物理実験施設は、ADSの炉物理上の課題である「核破碎中性子源で駆動される高速未臨界体系の核特性評価」、「加速器駆動ハイブリッドシステムの運転・制御性検証」及び「MA及びLLFPの核変換特性評価」を目的とした臨界実験施設である。本報告書は、核変換物理実験施設について、加速器施設から陽子ビームを導入する方法、装置の概略仕様、施設の安全性確保の考え方など、施設検討で最も重要な部分についての検討をまとめたものである。

Conceptual Study of Transmutation Experimental Facility
(1) Outline of Transmutation Physics Experiment Facility

Hiroyuki OIGAWA, Yujiro IKEDA, Toshinobu SASA,
Shin-ichiro MEIGO, Hideki TAKANO,
Kazufumi TSUJIMOTO⁺ and Kenji NISHIHARA⁺

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 25, 2000)

Under a framework of JAERI-KEK joint project of high intensity proton accelerator, we have been carrying out a conceptual study of an experimental facility dedicating to the development of transmutation technology using the accelerator driven sub-critical system (ADS). The facility consists of two buildings; named as Transmutation Physics Experiment Facility and Transmutation Engineering Experiment Facility. The former facility is designed to evaluate the neutronics of a fast neutron sub-critical system with a spallation source, to examine the performance of a hybrid system driven by an accelerator, and to study the transmutation properties of minor actinides and long-lived fission products. This report summarizes the present status of the design study of the facility, in particular, focusing on the proton beam injection technique, principal specifications and the safety design policy.

Keywords: Joint Project, High-intensity Proton Accelerator, Spallation Neutron Source, Transmutation, Critical Assembly, Accelerator Driven Sub-critical System, Physics Experiment, Neutronics, Reactor Physics, Minor Actinide, Long-lived Fission Product

⁺ Department of Nuclear Energy System

目 次

1.はじめに	1
2.核変換物理実験装置の概要	3
2.1 背景及び実験目的	3
2.2 装置概念	3
2.3 実験内容	4
2.3.1 核破碎中性子源で駆動される高速未臨界体系の核特性評価	5
2.3.2 加速器駆動ハイブリッドシステムの運転・制御性検証	7
2.3.3 MA 及び LLFP の核変換特性評価	8
3.陽子ビーム導入機構の概要	10
3.1 機構の構成	10
3.2 陽子ビームの特性	11
3.2.1 陽子ビームの時間特性	11
3.2.2 レーザー及びフォイルによる荷電変換特性	11
3.3 故障想定時の挙動	11
3.3.1 レーザー出力異常時におけるビーム挙動	11
3.3.2 電磁石の故障	11
4.施設切り離しの考え方	13
4.1 切り離し方式案	13
4.2 考察	14
5.施設の機器構成	16
5.1 原子炉施設の位置	16
5.2 原子炉施設の一般構造	16
5.3 原子炉本体の構造及び設備	16
5.4 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備	19
5.5 原子炉冷却系統施設の構造及び設備	20
5.6 計測制御系統施設の構造及び設備	20
5.7 放射性廃棄物の廃棄施設の構造及び設備	25
5.8 放射線管理施設の構造及び設備	25
5.9 原子炉格納施設の構造及び設備	26
5.10 その他原子炉の附属施設の構造及び設備	27
6.安全設計の考え方	28
6.1 安全設計の基本方針	28
6.2 核変換物理実験施設の安全設計方針	29
6.2.1 用語の定義	29
6.2.2 安全設計方針	30
6.3 耐震設計方針	37
6.3.1 耐震設計の基本方針	38
6.3.2 耐震設計上の重要度分類	38
6.4 陽子ビーム輸送機構	39

6.4.1	概要	39
6.4.2	設計方針	39
6.4.3	主要設備（ビームライン分離方式：F案）	39
6.4.4	主要設備（レーザー発振器分離方式：G案）	40
6.4.5	評価	40
7.	故障・事故の想定	42
7.1	安全設計評価用想定	42
7.1.1	運転時の異常な過渡変化	42
7.1.2	事故	43
7.2	立地評価用想定	43
7.2.1	重大事故	43
7.2.2	仮想事故	43
8.	まとめ	44
	謝 辞	45
	参考文献	46

Contents

1.	Introduction	1
2.	Outline of Transmutation Physics Facility	3
2.1	Background and Purpose of Experiment	3
2.2	Concept of Facility	3
2.3	Experiments	4
2.3.1	Neutronics Property for Fast Neutron Sub-critical System Driven by Spallation Source	5
2.3.2	Controllability of Hybrid System Driven by Accelerator	7
2.3.3	Transmutation Property of Minor Actinides and Long-lived Fission Products	8
3.	Concept of Proton Beam Introduction Mechanism	10
3.1	System Structure	10
3.2	Characteristics of Proton Beam	11
3.2.1	Time Structure	11
3.2.2	Charge Exchange by Laser and Foil	11
3.3	Anticipated Behavior at Trouble	11
3.3.1	Beam Behavior at Abnormal Laser Power	11
3.3.2	Trip of Electric Magnet	11
4.	Concept of Facility Separated from Accelerator	13
4.1	Candidates of Concept	13
4.2	Discussion	14
5.	Composition of Facility	16
5.1	Position	16
5.2	General Structure	16
5.3	Structure and Equipment of Reactor	16
5.4	Structure and Equipment of Handling and Storage Installation for Nuclear Fuel	19
5.5	Structure and Equipment of Reactor Cooling System	20
5.6	Structure and Equipment of Monitoring and Control System	20
5.7	Structure and Equipment of Exhaust Installation of Radioactive Waste	25
5.8	Structure and Equipment of Radiation Control System	25
5.9	Structure and Equipment of Reactor Containment Facility	26
5.10	Structure and Equipment of Other Additional Installations	27
6.	Outline of Safety Design	28
6.1	Fundamental Policy for Safety Design	28
6.2	Safety Design Policy of Transmutation Physics Experiment Facility	29
6.2.1	Definition of Terms	29
6.2.2	Safety Design Policy	30

6.3 Design Policy for Earthquake-proof	37
6.3.1 Fundamental Policy for Earthquake-proof Design	38
6.3.2 Classification of Equipment for Earthquake-proof Design	38
6.4 Proton Beam Transport Mechanism	39
6.4.1 Outline	39
6.4.2 Design Policy	39
6.4.3 Principal Device for Beam Line Separation Concept	39
6.4.4 Principal Device for Laser Oscillator Separation Concept	40
6.4.5 Safety Evaluation	40
7. Anticipated Behavior at Trouble and Accident	42
7.1 Anticipation for Safety Design Assessment	42
7.1.1 Abnormal Transient at Operation	42
7.1.2 Accident	43
7.2 Anticipation for Site Appropriateness Assessment	43
7.2.1 Major Accident	43
7.2.2 Hypothetical Accident	43
8. Summary	44
Acknowledgements	45
References	46

1. はじめに

大強度陽子加速器計画⁽¹⁾の一環として、加速器駆動未臨界システム（ADS）を用いた核変換技術の研究・開発⁽²⁾を目的とした核変換実験施設の検討を行っている。核変換実験施設は、核燃料と核破碎中性子源を用いて ADS 概念の成立性に係る炉物理及び運転・制御に関する研究・開発を目的とする「核変換物理実験施設」と、ADS 特有の構造であるターゲット及びビーム窓の熱構造設計及びシステム技術の確立を目指した「核変換工学実験施設」⁽³⁾の二つの主要施設で構成される。

この内、核変換物理実験施設は、未臨界状態とした臨界実験装置に陽子ビームを導入し、高速中性子増倍体系を核破碎中性子源で駆動する施設である。未臨界度の測定精度や反応度に関する情報の精度を高めるために、臨界状態での実験も行う施設である。従って、原子力基本法第3条に定める「原子炉」の範疇に属する実験装置であり、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下「原子炉等規制法」という。）の適用を受ける。

Fig.1.1 に大強度陽子加速器計画の施設配置案を示す。核変換物理実験施設と核変換工学実験施設は 600MeV リニアックの出口（東海研ヘンデル棟の南側付近）で、200kW の陽子ビームを受ける計画である。200kW の内の 10W 程度を核変換物理実験施設に導入できるようにビーム取り出し機構を備え、殆どの陽子は核変換工学実験施設に導入する。

核変換物理実験施設以外の施設、すなわち、リニアック、シンクロトロン加速器及びビーム輸送系で構成される加速器群並びに核変換工学実験施設、生命・物質科学実験施設等で構成される研究施設群は、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」（以下、「放射線障害防止法」という。）の適用を受ける。この内、核変換物理実験施設に陽子ビームを供給するリニアック及びビーム輸送系は核変換物理実験施設と核変換工学実験施設が共有する部分であり、さらに、リニアックの一部は他の加速器群及び研究施設群の全てとの共有部分となる。

原子炉の範疇に属する核変換物理実験施設はその装置製作及び施設建設に着手するまでに、原子炉等規制法に則った許認可手続きを要する。すなわち、厳重な安全審査を経て行われる原子炉設置の許可、及び、製作・建設の着手前に得なければならない設計及び工事の方法の認可である。現時点における施設の検討状況等から見て、これらの諸手続を経て核変換物理実験施設の製作・建設に着手できるのは平成 15 年以降になる見込みである。一方、放射線障害防止法では、放射線発生装置及び放射性同位元素取扱施設としての使用許可是使用開始までに受けければよい。現在のところ、核変換物理実験施設以外の大強度陽子加速器計画の各施設の建設は平成 13~14 年にかけて着手する計画である。

以上で述べたように、核変換物理実験施設に陽子ビームを供給する加速器の建設着手は核変換物理実験施設の設置許可よりも先行することになる。しかしながら、加速器部分が原子炉施設の一部として原子炉等規制法の適用を受けるとすると、設置許可以前に加速器部分の製作・建設に着手することができないため、計画全体が遅れることになってしまう。そこで、核変換物理実験施設を加速器施設から許認可上で切り離し、それぞれの装置製作

及び施設建設を独立に進めることができるようにしなければならない。特に、核変換物理実験施設の原子炉施設としての安全性を施設内で閉じて担保することがこの「施設切り離し」にとって重要であると考えられる。

本報告書は、核変換物理実験施設の目的・実験項目・概略仕様を示し、加速器施設から陽子ビームを導入する方法及び加速器施設との施設切り離しの考え方を考察し、施設の安全性に関する検討等について概要をまとめたものである。

以下、第2章では核変換物理実験装置の概要について、第3章では陽子ビームを核変換物理実験装置に導入するための機構の概要について、第4章では核変換物理実験施設と加速器施設の切り離しの考え方について述べる。その後、核変換物理実験施設の設置許可申請を念頭に置いて、第5章で機器構成について、第6章で安全設計について、第7章で事故時の挙動についてそれぞれ簡単な考察を行う。第5～7章は現時点における施設切り離しの議論のために必要な部分に限ったものである。また、今後の詳細な検討により変更になる部分があると考えられる。

2. 核変換物理実験装置の概要

2.1 背景及び実験目的

加速器駆動未臨界体系(ADS)を用いるマイナーアクチニド(MA)及び長半減期核分裂生成物(LLFP)の核変換システムは、臨界体系を用いる専焼高速炉システム(ABR)に比べて次のような利点を有する。

- ① ADSは、臨界状態である一般の原子炉のように小さな反応度印加でシステムが大きな影響を受けることがない。従って、ドップラー効果等の負のフィードバックの必要性が低いため、燃料組成選択の制約が少ない。
- ② MAを主成分とする燃料を用いたABRでは実効遅発中性子割合が小さいため、遅発臨界から即発臨界への移行に $0.1\%\Delta k/k$ 程度の余裕しかない。プルトニウムを燃料とする一般の高速炉でも $0.3\sim0.5\%\Delta k/k$ 程度である。一方、ADSは例えば $k_{eff}=0.95$ で運転することが可能であり、この場合、即発臨界まで $5\%\Delta k/k$ 以上の余裕ができることになる。

これらの観点から、原研ではADSを核変換システムの第一候補として研究・開発を進めている。

現在概念検討を進めているADSの実用システムは、大電流陽子加速器(陽子エネルギー: 1.5GeV、出力20~30MW)から供給される陽子を冷却材を兼ねる鉛-ビスマス液体ターゲット又はナトリウム冷却の固体タンクステンターゲットに照射し、核破碎反応によって大量に発生する中性子を実効増倍率(k_{eff})0.95程度の未臨界体系で増倍して核変換を行うものである。核分裂反応によって発生する熱エネルギー(800MWth)は発電に利用し、電力の一部は加速器の運転に供する。残りの電力を売電することも可能である。

最近、ADSに関する研究・開発は原研の他CEA、LANL、PSI、CERNなどでも盛んに行われるようになってきた。CEAでは臨界実験装置MASURCAを用いたMUSE計画⁽⁴⁾が進行中である。MUSE計画では、Cf-252中性子源(核分裂スペクトル、 $7\times10^7n/s$)やD-T中性子源(14MeV、 $5\times10^9n/s$)を導入し、未臨界体系の炉物理に関する基礎的な実験を行っている。LANL及びPSIでは既存の陽子加速器(出力1MW程度)で鉛-ビスマスのターゲット実験を行う予定である。CERNでは天然ウラン-水の体系($k_{eff}\approx0.9$)に鉛のターゲットを置き、600MeV~2.75GeVの陽子パルス($\approx10^9$ 陽子/パルス)を打ち込んで体系の微少な温度上昇を測定し、エネルギー増倍率を求めている。⁽⁵⁾これらの実験の他に、鉛やタンクステンのターゲットに陽子ビームを照射し、核破碎中性子の発生数、エネルギースペクトル、角度依存性、位置依存性等の測定が各国で行われ、計算コードとの比較が行われている。しかしながら、高速中性子未臨界体系に核破碎中性子源を導入し中性子増倍の定量的な評価を行った事例や、このような体系を長時間にわたって安定に運転した事例はない。

ADSの実用化に向けては炉物理、運転・制御、材料(窓材、鉛-ビスマス等)、燃料(MA窒化物燃料)等の多くの開発課題を克服しなくてはならない。本報告書で検討する核変換物理実験施設は、世界で初めて核破碎中性子源と高速中性子未臨界体系を組み合わせることにより、ADSの物理及び運転・制御性並びにADSを用いた核変換技術について基礎的な知見を得るために装置である。

2.2 装置概念

高速炉臨界実験装置に関する板状燃料とピン状燃料、水平タイプと垂直タイプ、分割型と一体型の得失に関する議論は1950～60年代になされ、各国が独自の判断により多様な装置を製作し、実験を行ってきた。現在、高速炉臨界実験装置は原研のFCA（板状燃料水平2分割型）の他にフランスのMASURCA（ピン状燃料垂直一体型）及びロシアのBFS（円盤燃料垂直一体型）が稼働中である。Table 2.1にFCA建設当時に行われた垂直一体型と水平2分割型の得失に関する議論の要点をまとめる⁽⁶⁾。

核変換物理実験装置では、FCAと同じ板状燃料水平2分割型を採用することとする。水平2分割型装置は、実験の面からは炉心移動側集合体の位置の再現性が反応度価値の実験誤差に影響すること、密着面に引き出し前端面及び間隙が存在するため臨界量の補正が必要なこと等の不利な点があるが、安全性の面からは原子炉停止時及び燃料装荷時に深い未臨界状態を確保できる利点がある。板状燃料と多様な模擬物質を組み合わせる方式は、実プラントで用いられるピン型燃料とは形状が異なる点で不利であるが、非常に広範囲の組成模擬が可能である点で優れている。本装置でFCAと同じ方式を採用する大きな理由としては、33年にわたって蓄積したFCAでの経験と燃料板、模擬物質板、実験装置等の財産を有効に利用したいことが挙げられる。但し、これまでに得た知見に基づき、FCAで問題となっていた点（金属ウラン燃料の塗装剥離、燃料装荷時の被ばく等）については積極的に改良を加えていくことが必要である。

燃料及び種々の模擬物質（鉛、ナトリウム、アルミナ、ジルコニウム、ステンレス鋼等）は5cm×5cmの大きさで種々の厚さのものを用意し、燃料引き出しに装填する。燃料引き出しは集合体の格子管に装荷する。FCAにおける集合体及び燃料引き出しの概念をFig.2.1及びFig.2.2に示す。集合体は正方断面の格子管（ピッチ55mm）を51行×51列に束ねたものであり、全体で幅2.8m、高さ2.8m、奥行き2.6mである。核変換物理実験施設では、FCAと異なり中心の格子管1本を陽子ビーム導入管及び核破碎ターゲット用として用いることができる。

制御装置としては、移動側集合体駆動装置の他に制御・安全棒を備える。制御・安全棒は燃料で構成され、通常はモーターで駆動するが緊急停止時には空気圧で引き抜く構造である。

核変換物理実験装置の最高出力は、実験の項目、放射線遮蔽、除熱系統等とそれに要するコストを検討して慎重に決めなければならないが、通常の臨界実験のレベルである核分裂出力500Wとする。また、深い未臨界度でも100W程度の核分裂出力を得るために、陽子ビームの最高値は10Wとする。従って、核分裂エネルギー及び陽子ビームによる機器の発熱を冷却する必要はない。但し、プルトニウム燃料を用いる際には、主にPu-240のα崩壊による発熱を冷却し炉心の温度を一定に保つために格子管冷却設備を設ける。

本施設に導入する陽子ビームは600MeVに加速された繰り返し数25Hzのパルス状ビームである。隣接する核変換工学実験施設で使用する200kWのマイナスに荷電した陽子ビームの一部をレーザーで荷電変換し取り出す方式（第3章参照）を検討している。ターゲット部分は固体の鉛、ビスマス、タンクステン等で可変とする。定常中性子源(Cf-252及びDT)を設置し、核破碎中性子源との比較ができるようにする。

2.3 実験内容

実験内容はその目的によって主に次の3項目に分けることができる。

- ①核破碎中性子源で駆動される高速未臨界体系の核特性評価
- ②加速器駆動ハイブリッドシステムの運転・制御性検証

③MA 及び LLFP の核変換特性評価

Table 2.2 に行うべき実験の目的と対応する研究開発課題を挙げた。以下、各項目の実験の概要をまとめる。

2.3.1 核破碎中性子源で駆動される高速未臨界体系の核特性評価

DT 中性子源や RI 中性子源を高速未臨界体系に導入した実験は、既存の臨界実験装置で行われているが、核破碎中性子源を用いた実験はこれまでに世界的にも例がない。DT 中性子源や RI 中性子源はほぼ単色エネルギースペクトル又は核分裂中性子スペクトルを持つ点状線源であるが、核破碎中性子源は数百 MeV から数十 keV に広く分布するエネルギースペクトルを持ち、空間的にも分布を持つのが特徴である。

Fig.2.3 に示した単純な RZ 炉心モデルにおける中性子束のエネルギー分布を Fig.2.4 に示す。ターゲット平均の中性子束には中性子源による高エネルギー成分と炉心からの流れ込みによる低エネルギー成分が比較的多いことが特徴である。炉心平均では、高エネルギー一側に若干中性子源の影響が見られるが、10MeV 以下の中性子エネルギーでは高速炉と類似したエネルギー分布となっている。

次に、Fig.2.3 に示した RZ 炉心モデルにおいて、鉛ービスマスマスター ターゲットに様々なエネルギーを持つ陽子が入射する場合の中性子源の軸方向分布を Fig.2.5 に、径方向分布を Fig.2.6 に示す。軸方向に見るとビーム入射面から数センチメートルの地点で中性子源強度が最大になり、数十センチにわたって減衰していく。径方向に見ると、ターゲット部を出ると中性子源密度は 1 衍程度落ちるが、無視できない量の中性子が炉心で生成していることが分かる。

陽子の加速エネルギーに着目すると、中性子源の強度 (Fig.2.5 の軸方向分布の面積に相当) 及び空間分布が 1.5GeV、1GeV、0.6GeV では異なることが分かる。陽子 1 個当たりの中性子発生数は各エネルギーでそれぞれ 45 個、30 個、15 個程度である。核変換物理実験施設で使うことのできる陽子は 600MeV であり、ADS 実用システムで想定している 1.5GeV に比べて中性子発生数は 1/3 に、陽子の飛程は 1/2 になる。しかしながら、陽子エネルギー - 600MeV を確保できれば、陽子 1 個当たり 10 個以上の中性子が発生し、中性子源がターゲット内に空間分布するという核破碎反応の特徴は得られるため、ADS の基礎的な特性を把握するための実験には十分なエネルギーであると考える。また、大強度陽子加速器計画では将来における加速エネルギーの増強を目指しており、1GeV 近辺での測定も可能となる。

核破碎中性子源の特性はターゲット単独では実験的な検証がいくつか行われているが、中性子増倍体系において核破碎中性子源の特性が核特性に及ぼす影響を実験的に評価した例はない。そこで、以下に示すような実験を計画する。

(1) 未臨界体系における出力分布

中性子源を未臨界体系に置いた場合、出力分布は臨界時のものからずれたものとなる。特に、核破碎中性子源の空間・エネルギー分布は出力分布に大きく影響を及ぼす。Fig.2.7 に ADS の径方向出力分布を示す。ターゲットに隣接する領域で出力ピークが見られ、燃料の熱的制限などの観点からこの領域での出力分布の予測精度評価が重要であることが分かる。

実験では、箔及び核分裂計数管を用いた測定及び γ スキャンニング法で未臨界度依存の出力分布を測定し、特にターゲット近辺における出力ピークの予測精度を評価する。さらに、出力平坦化をねらった多領域炉心を組み、その効果を検証する。

(2) 未臨界度の決定

システムの未臨界を担保するだけでなく、システムの出力決定に影響する未臨界度の精度の良い予測及び測定は、ADS システムにとって最も重要な事項である。しかしながら、現在までの未臨界度の測定及び計算に関する研究は臨界安全の観点から進められてきているため、ADS の設計に十分なものとはいえない。例えば、実効増倍率 $k_{eff} = 0.95$ において k_{eff} に±1%の誤差を見込むと、中性子増倍率（未臨界度の逆数 $1/(1-k_{eff})$ ）は 25 ($k_{eff} = 0.96$) から 17 ($k_{eff} = 0.94$) までの不確かさを持つことになる。そこで、未臨界度の測定精度及び計算精度を評価し、精度向上を図る。

実験では、修正中性子源増倍法、パルス中性子法、中性子源引き抜き法などの様々な測定手法により、燃料装荷作業時、運転停止時、運転時の各場合における未臨界度測定技術の確立を図る。未臨界度の測定に必要な実効遅発中性子割合 β_{eff} や即発中性子寿命 Λ も測定で求める。 β_{eff} は Cf 中性子源法で、 Λ はパルス中性子法で測定することができる。

(3) 中性子源の実効強度

未臨界体系の出力は、中性子源強度／未臨界度すなわち $S/(1-k_{eff})$ で決まる。ターゲットと炉心で構成された体系における核破碎中性子源の強度は未だ測定されたことが無いため、まず中性子源強度の予測精度評価が必要である。また、中性子源強度には中性子源の空間・方向・エネルギー分布を考慮した「実効強度」を用いる必要があるが、核破碎中性子源での測定例はない。

実験は、非増倍体系での中性子源強度の絶対測定と未臨界体系 (Cf-252 および核破碎中性子源) での絶対出力測定及び未臨界度測定を組み合わせて行う。未臨界度を系統的に変化させて測定することにより、実験結果の信頼性向上を図る。

(4) 高エネルギー中性子の影響

炉心における高エネルギー中性子成分の割合は既に Fig.2.4 で示したように多くはないが、(n,xn)反応などを通して中性子源強度に影響を及ぼす。さらに、高エネルギー中性子は透過力が極めて高いため、放射線遮蔽の観点からも重要である。

測定では高エネルギー中性子に感度を持つ放射化反応を用いて空間分布を測定する。また、加速器から供給される短パルスの陽子ビームを使って TOF 法による中性子スペクトルの測定を行う。

(5) ターゲット、ビーム窓、ボイドの存在

炉心中心軸上のターゲット、ビーム窓、ビーム輸送管内のボイド等の構造は ADS 特有のものであり、実効増倍率や出力分布の予測精度に大きく影響を及ぼすと考えられる。

実験ではこれらの構造を臨界体系に置いた場合と置かない場合で実効増倍係数、出力分布等の核特性予測精度に対する影響を評価する。また、未臨界体系でターゲット及びビーム窓の位置を移動し、実効中性子源強度及び出力分布への影響を評価する。さらに、ADS の実プラントにおいてビーム窓が破損して液体ターゲットがビーム輸送管に侵入する事故を模擬し、反応度の変化を測定する。

(6) 鉛ービスマス冷却材の模擬

ADS の冷却材としては鉛ービスマスが第 1 候補として考えられている。鉛ービスマスを用いた場合の中性子スペクトルの予測精度および冷却材ボイド反応度の予測精度の評価を

臨界体系を用いて行う。

2.3.2 加速器駆動ハイブリッドシステムの運転・制御性検証

運転・制御の観点からみて、臨界システムと比べた場合の加速器駆動ハイブリッドシステムの特徴及び課題は以下の点である。

- ① 臨界システムの出力制御は基本的に制御棒で行うが、加速器駆動システムではビーム出力の調整で出力を制御する。(加速器駆動システムに制御棒を導入する考え方もあるが、主に燃焼反応度の補償に用いる。)
- ② 臨界システムの場合はゼロ出力状態から所定の出力(動力炉ならギガワット・レベル)までを緩やかに上昇させることができるが、加速器の出力を数桁にわたって安定に調整することは今後の開発課題であり、加速器駆動システムの立ち上げ時には出力が急激に上昇する場合も想定する必要がある。
- ③ 臨界システムにおける緊急停止(スクラム)の頻度は非常に少ないが、現在の加速器技術では1週間に数回程度のビームトリップは避けられないと考えられている。今後ビームトリップの頻度低減化に関する開発は行うが、加速器駆動システムにおけるビーム停止と復帰を安全に管理するための運転ロジックの開発は平行して進める必要がある。

これら臨界システムとの相違点に起因する諸問題を克服し、加速器駆動ハイブリッドシステムの運転経験を積むことを目的として以下に示すような実験を行う。

(1) ビーム出力の調整によるフィードバック制御

未臨界実験体系に入射するビーム出力を制御し、加速器駆動未臨界システムの安定な運転を試みる。ADS の基本概念では加速器のイオン源で陽子ビーム出力を制御することを考えているが、本実験計画では他施設への影響を避けるために加速器から供給されるビームを第3章で述べるビーム制御装置を用いて調整する。本実験計画で使用できる陽子ビームはデューティー1.25% (25Hz でパルス幅 500μs) のパルス状であるため、時間応答が早くデッドタイムの短い検出器を用いる必要がある。

(2) ビームトリップ時及び立ち上げ時の挙動

ビームトリップが発生したときには炉出力は急激に低下し、再びビームが入射されると急速に元の炉出力に戻る。このような事象は炉心材料に熱衝撃・疲労を与えるため好ましくない。そこで、ビームトリップ後の再立ち上げ時を模擬した最適な制御ロジックを構築し、その検証のための運転を行う。

(3) 温度係数の測定(炉心、ターゲット)

ADS では炉心の温度係数は臨界炉ほど重要ではないが、臨界までの裕度やビームトリップ時の温度変化に伴う反応度変化などを把握することが必要である。また、ビーム窓やターゲットの膨張による反応度変化及び実効中性子源強度の変化は、今までの臨界システムでは考慮する必要の無かった項目であり、その影響を評価する必要がある。

実験では、核分裂による発熱を用いずにヒーターにより炉心を昇温する。但し、測定できる温度範囲は今後の検討課題とする。

(4) 出力振動、炉心のデカップリング

未臨界度が深く、中心にターゲット領域を持つ体系では、高次モードが励起され、出力振動や炉心のデカップリングが問題となる恐れがある。実験では故意に非対称となる位置に模擬制御棒などによる振動を加えて出力変動の程度を測定し、固有値間隔等のパラメータを測定する。

(5) エネルギー増倍率の決定

加速器によって投入したエネルギーと核分裂エネルギーとして回収できるエネルギーの比を「エネルギー増倍率」と定義する。エネルギー増倍率は加速器駆動システムの基本的な特性量である。これをビーム出力の絶対測定及び核分裂率の絶対測定から実験的に求めること。

2.3.3 MA 及び LLFP の核変換特性評価

Np-237、Am-241、Am-243、Cm-244 等のマイナーアクチニド(MA)と Tc-99、I-129 等の長寿命核分裂生成物(LLFP)を核分裂反応及び中性子捕獲反応によって変換するシステムを実証することが原研における ADS 研究・開発の目的である。MA を燃料の主成分とする原研の核変換システムでは、MA の核データが非常に重要であり、MA を使った臨界実験により核データの積分テストを行う必要がある。これまでいくつかの核種については FCA において核分裂計数管による核分裂率測定及び 20g 程度のサンプルによる反応度価値測定が行われている。しかしながら対象が限られているのでさらにデータを拡充する必要がある。核変換物理実験施設では FCA における実験手法及び対象核種を拡充し、MA 及び LLFP の核データの積分評価を行う。また、MA 窒化物燃料を模擬した領域を設定し、中性子増倍特性、出力分布、核変換率、中性子スペクトル等の核特性を測定する。さらに、減速領域を設けて LLFP を中性子捕獲反応により核変換するシステムについての検証を行う。

臨界システムか加速器駆動ハイブリッドシステムかによらず、MA を装荷した核変換システムを構築するためには、臨界実験装置による核特性予測精度の検証が不可欠である。核変換物理実験施設を放射線強度の強い MA を取り扱うことのできる施設として設計することは、核変換技術の研究・開発を進める上で非常に重要である。

(1) MA の核変換率測定

Np-237、Am-241、Am-243、Cm-244 などの核分裂率を核分裂計数管及び箔により測定し、これらの核種の核データの積分評価に資すると共に、核分裂による消滅率の予測精度を評価する。未臨界体系及び臨界体系の両方で測定し、予測精度の比較・検討を行う。

(2) MA、LLFP のサンプル反応度価値測定

核データの積分テストとして、上記 MA に加えて Tc-99 及び I-129 のサンプル(10g 程度)を用意し、反応度価値を測定する。中性子束のエネルギー分布を系統的に変化させて測定を行う。

(3) LLFP 用減速領域付き体系の核特性

LLFP の効率的な核変換のためには高速中性子を減速する必要があるが、このような減速材付き集合体が周りの燃料の出力分布に影響を及ぼす恐れがある。実験では未臨界体系及び臨界体系で模擬減速領域を設け、出力分布や LLFP の反応率の測定を行い、影響を実験的に確かめる。

(4) MA 窒化物燃料の模擬

核変換プラントで用いる予定の MA 窒化物燃料を模擬した領域を構築し、未臨界度、出力分布、動特性パラメータ等の核特性の予測精度を評価する。

3. 陽子ビーム導入機構の概要

本章では、核変換物理実験施設へ陽子ビームを導入する機構の概要について述べる。

3.1 機構の構成

陽子ビーム導入機構は、ビーム上流側（加速器側）から下流側（核変換物理実験施設側）にかけて以下の機器で構成される。これらの構成を Fig.3.1 に示す。ほぼ全輸送ラインにわたって、周期長 5.35m からなるラティス（電磁石の構成単位）を用いる。加速器から供給される陽子ビームは、陽子 1 個がそれぞれ電子 2 個を帯びた H⁻イオンのビームである。

- 1) H⁻ビーム輸送直線部
 - 4 極電磁石を用いて加速器からのビームを輸送する。
- 2) H⁻ビーム輸送曲線部
 - 5 台の偏向電磁石を用いて、ビーム進行方向を超伝導ライナック出射方向から水平方向に 60° 曲げる。
- 3) レーザー荷電変換器
 - H⁻ビームにレーザーを照射し、H⁻イオンの 2 個の電子のうち 1 個を「引き剥がす」ことによって H⁻イオンを H⁰イオンに荷電変換する。
 - レーザーの強度、照射時間等によって荷電変換効率を調整する。
 - 残留ガスによる荷電変換の寄与を少なくするため、前述したビーム輸送曲線部と後述する振り分け部の間の直線部分の長さを可能な限り短くする。(1 m 程度以内)
 - 荷電変換効率を上げるために、陽子ビームの高さ(Y)は 3mm 程度にする。
- 4) 核変換工学実験施設への振り分け部
 - 側向電磁石により H⁻イオンを核変換工学実験施設に振り分ける。核変換物理実験施設に輸送する H⁰イオンは直進する。
 - レーザー荷電変換器で荷電変換された H⁰イオンを直進させ、荷電変換フォイルに輸送する。
- 5) 荷電変換フォイル
 - ビーム直徑は 6mm 程度にする。曲線部出口からここまで H⁰イオンは磁場の影響を受けずに直進する。
 - プラスチックフォイル等を用いて H⁰イオンの電子を「引き剥がし」、H⁺に荷電変換する。
- 6) 核変換物理実験施設への振り分け部
 - H⁺イオンを偏向電磁石 2 台で 60° 曲げ、核変換物理実験施設に輸送する。
 - 曲げない場合には、核変換工学実験施設に設置するビームダンプへ輸送する。
- 7) ビーム制御部
 - この制御部は F 案（次章の Table 4.1 参照）で使用する。核変換物理実験施設の入り口に設置する。
 - H⁺ビーム強度の制御のために 4 極電磁石 2 台を用いてビームを拡大し、コリメータ（孔 2x2 cm）を通過させ、ビーム強度を制御する。
 - 電磁石とコリメータの距離は 6 m 程度離す。
 - 電流制御は 4 極電磁石の磁場強度を変化させて行う。

3.2 陽子ビームの特性

3.2.1 陽子ビームの時間特性

陽子ビームの時間構造を Fig.3.2 に示す。陽子ビームはマイクロバンチ(繰り返し 3 ns、幅 約 1 ns)、中間パルス(繰り返し 500ns、幅 270 ns)、マクロパルス(繰り返し 40 ms、幅 500 μ s) の構造から成り立つ。中間パルスは 90 個のマイクロバンチから成り立ち、マクロパルスは 1000 個の中間パルスから成り立つ。よって、600 MeV、200 kW 運転におけるマイクロバンチ、中間パルス、およびマクロパルス毎の出力はそれぞれ、88mJ、8J、8kJ となる。

3.2.2 レーザー及びフォイルによる荷電変換特性

荷電変換器のレーザーには、 $H^- \rightarrow H^0$ の荷電変換の断面積が極大となる $1\mu m$ 近辺の波長を有するものを使用する。YAG レーザーは波長が $1.06\mu m$ であり、種類も豊富であるため、これを採用する予定である。

レーザーの運転形態としては、パルス幅をナノ秒オーダーとした強いレーザーパルスでマイクロバンチ単位の陽子ビームを切り出す「短パルス運転」と、レーザーパルス幅を百マイクロ秒オーダーとした弱いパルス又は連続発振でマクロバンチ単位の陽子ビームを”広く・薄く”荷電変換する「長パルス運転」を考えられる。短パルス運転では、レーザーパルス 1 ショット (パルス幅 12ns) 当たりの出力を 1.4 J とすると、荷電変換の断面積から約 66 % の陽子を荷電変換できると考えられる。このパルス幅は 200kW ビームのマイクロバンチ 4 個分に相当するため、 H^0 ビームとして取り出される陽子出力は次式より約 5.8W となる。

$$200 (\text{kW}) \times \frac{4}{90 \times 1000} \times 0.66 = 5.8 (\text{W})$$

長パルス運転では、荷電変換効率を 2.5×10^{-5} とすれば 10W の陽子ビームを H^0 に変換できる。連続ビームのレーザー発振器を使用すると 3kW の高出力レーザーが必要となる。一方、 $500\mu s$ のパルス幅で 25Hz の繰り返しのレーザー発振器を使用すれば、陽子ビームと同期させることにより、40W 程度のレーザー出力で 10W の陽子ビームを H^0 に変換できる。

$H^- \rightarrow H^+$ の荷電変換フォイルには数百 $\mu g/cm^2$ のポリエチレンフォイルを使用することを予定している。この場合、荷電変換の断面積は $10^6 barn$ と大きいために、ほぼ 100% の効率で荷電変換できる。

3.3 故障想定時の挙動

3.3.1 レーザー出力異常時におけるビーム挙動

レーザーの出力が何らかの原因で設定値を超えた場合でも、発振器の最大出力で決まる荷電変換効率を超えることはないと考えられる。例えば、前述の短パルス運転の場合、レーザーパルス 1 ショット当たりの出力が 1.4J を超えない発振器を使用すると、レーザー出力を絞った実験を行っている際に誤ってレーザー出力が最大となても核変換物理実験施設に導入される陽子ビームは 5.8W 以下である。長パルス運転の場合も核変換物理実験施設に導入される陽子ビームが 10W を超えないような最大出力を持つレーザー発振器を使用する。

3.3.2 電磁石の故障

電磁石の故障による取り出しビームの挙動を考えてみる。電磁石の故障には、電源の故障、マグネットのショート等が考えられる。

H^- イオン輸送部における故障は陽子ビームの散逸を招き、荷電変換部における H^- ビームが減少するため、結果として核変換物理実験施設へ導入される陽子ビームは減少する。

レーザー荷電変換器の上流の偏向電磁石(Fig.3.1の”BM1”)が故障を起こした場合には、核変換工学実験施設に輸送される H^- ビームも直進し、荷電変換フォイル(Fig.3.1の”SF”)で直接 H^+ に変換される。しかしながら、核変換物理実験施設に振り分ける偏向電磁石(Fig.3.1の”BM2”)とBM1とを直列に接続することにより、BM1とBM2は常に同時に停止し、陽子ビームは核変換物理実験施設に導入されずにビームダンプへ向かう。

4. 施設切り離しの考え方

第1章で述べたように、加速器施設が先行して建設されること及び原子炉施設は工事前に許認可を終えなければならないことから、核変換物理実験施設を他の加速器施設から切り離して許認可の申請を行う必要がある。本章では、第2章で述べた核変換物理実験装置（原子炉施設）に第3章で述べた方式で陽子ビームを導入する場合における核変換物理実験施設と加速器施設の切り離しの考え方を原子炉施設設置に係る許認可の観点から検討する。

4.1 切り離し方式案

切り離し方式の検討に際しては以下の3点を考慮する。

- ① 炉出力のフィードバック制御を行うための機器は原子炉施設の範囲とする。
- ② 原子炉の安全性に係る機器は原子炉施設の範囲である。
- ③ 未臨界状態で使用する限り加速器ビームの停止は原子炉の安全性に本質的には必要ない。

これらの点を踏まえて、これまでに検討した施設の切り離し方式について7つの考え方を以下に示す。Table 4.1に各考え方の概要及び得失をまとめた。

A. 原子炉施設追加方式

本方式では、 H^- を H^0 に変換することでフィードバック制御を可能にするレーザー荷電変換器、 H^0 を H^+ に変換する荷電変換フォイル、及び H^+ ビーム取り出し用電磁石を原子炉へ陽子ビームを供給する施設として「原子炉施設」と位置付ける。

これらの機器を設置するビームライン及びトンネルは核変換工学実験施設の建設時に造る計画であるが、これらビームライン及びトンネルを原子炉施設とした場合は核変換物理実験施設の設置許可前には建設できることになる。そこで、「加速器施設」として建設したビームライン及びトンネルの一部に「原子炉施設」に含まれる機器の一部を取り付けることとして、機器とビームライン及びトンネルを申請上で切り離す。これらの機器は故障や地震を想定しても原子炉本体に影響を及ぼす恐れがないため、安全機能を有しない機器とし、耐震性も一般産業施設と同等の安全を保持すればよいCクラスとする。

B. 核燃使用施設分離方式

本方式では、核変換物理実験施設は原子炉施設として建設するが、陽子ビームの導入は未臨界時に限るため、陽子ビーム導入に係る施設は「核燃料使用施設」としての範疇で申請するものとする。核燃料使用施設では法律上は着工前に設計及び工事の方法の認可を受ける必要がないため、レーザー荷電変換器などを事前に設置することができる。従って、核変換工学実験施設の使用開始時期が核変換物理実験施設の許認可に影響されることはない。核燃料使用施設としての使用開始前に使用時検査を受ける。

本方式では、燃料の区分が「原子炉燃料」となるが、「核燃使用施設」として用いる場合でも同じ燃料を使うため、燃料が二重規制となる。また、「核燃料使

用施設」として実験を行うには所定の未臨界度を超えて臨界に近付かないことの担保が必要である。

C. 核変換施設一括分離方式

レーザー荷電変換器より下流で核変換物理実験施設へのトンネル及びビームラインを構成する機器全てを原子炉施設とする方式である。この方式では施設の設置許可を受けてから着工しなければならない。従って、この部分が完成しないと核変換工学実験施設へのビーム供給ができないため、核変換物理実験施設の設置許可が遅れた場合には核変換工学実験施設の実験開始が遅れることになる。

D. 原子炉施設建て替え方式

ビームライン、トンネル、電磁石等で核変換工学実験施設でも必要となる部分を原子炉施設として建設し直す方法が考えられる。この内、既存の設備・機器を一旦破棄して再び同じ場所に施設を建設する方式が本方式である。コストが増加することが欠点である。また、工事中はビームを供給できないため、核変換工学実験施設の実験休止期間が長くなるおそれがある。

E. ビームライン付け替え方式

上記「原子炉施設建て替え方式」では既存の設備・機器を破棄して同じ場所に原子炉施設を建設する案であったが、本方式は実験を行いながら隣接した場所に新たにビームライン及びトンネルを建設し既存のものと接続する方式である。核変換工学実験施設の実験休止期間は短いが、余分のコストが増加するだけでなく、新たに建設するビームラインのための敷地を確保するために、全体の配置が最適化できずコスト増につながる。

F. ビームライン分離方式

陽子ビームライン上のレーザー荷電変換器によるフィードバック制御を行わず、核変換物理実験施設の原子炉建家内でコリメータ等を使った調整を行う方式である。600MeV 陽子を減衰させるのに十分な長さ ($\sim 80\text{cm}$) の鉄製ビームシャッターを配置し、ビームトンネルと原子炉建家の境界点を明確にする。ビームの停止にはレーザー荷電変換器ではなくビームシャッターを用いることにより、安全性の担保は原子炉建家内で閉じることができる。ビーム制御設備を追加建設するため若干のコスト増になるが、原子炉施設の範囲は明確になる。

G. レーザー発振器分離方式

本方式では、レーザー荷電変換器内のレーザー発振器は核変換物理実験施設へ導入される陽子ビーム強度を規定する機器であるとして、これを「原子炉施設」と位置付け、核変換物理実験施設内に設置するものとする。レーザービームは光ファイバー又は光学レンズを使った輸送系によってビームラインに導く。

4.2 考察

A案（原子炉施設追加方式）については、レーザー荷電変換器が有するインターロック機能は「安全機能」に属する可能性があり、そのような機能を有する機器を原子炉施設外に設置することが問題となるおそれがある。また、トンネルに原子炉施設の一部を設置する

ことになるため、トンネルの耐震性が問題となる。原子炉施設と加速器施設の境界が不明確であり、混乱を生じるおそれがある。以上の理由より、この案は現実的でないと考えられる。

B案（核燃使用施設分離方式）は陽子ビーム振り分け部分を核燃使用施設として申請することで加速器施設として先行使用を可能にすることを狙った案である。原子力船「むつ」においては、原子炉施設の燃料を一時的に核燃使用施設の燃料として取り扱うことを検討した事例があり、燃料が二重に規制対象となることには問題点がないと考えられる。しかしながら、臨界実験装置に核燃使用施設の要件である未臨界の担保をハード的に求めるのは困難であると考えられ、さらに実験上の制約が増えることから、この案は現実的ではないと考えられる。

C案（核変換施設一括分離方式）は、核変換工学実験施設へ与える影響が大きいことから、他の全ての案が実現できないときの最終選択肢として位置付ける。

D案（原子炉施設建て替え方式）及びE案（ビームライン付け替え方式）はコストの面で現実的ではないと考えられる。

F案（ビームライン分離方式）は、レーザー荷電変換によるフィードバック制御が実験上必要でないのなら有力な選択肢であると考えられる。レーザー荷電変換によるフィードバック制御の概念は魅力的であるが、コリメータ等を使った制御で対応可能であると考えられる。加速器施設との境界が明確になるため、コスト的にはA及びB案よりも有利になる可能性もある。原子炉施設と加速器施設の距離を大きくとれば、火災、耐震区分等による両施設間の安全上の干渉も少なくなり、F案の利点がより明確になると考えられる。

G案（レーザー発振器分離方式）は核破碎中性子源強度を調整するためのレーザー発振器を原子炉施設に設置するため、A案に比べて境界が明確になる利点がある。また、F案に比べてコストも低減できると考えられるが、レーザービームの輸送に関する詳細な検討を要する。

以上の考察より、F案及びG案を施設切り離し方式の候補として検討対象とする。

5. 施設の機器構成

FCA の原子炉設置許可申請書を参考に現時点で考えられる核変換物理実験施設の構成をまとめる。□で囲んだ部分は FCA の機器構成から変更となる部分である。

5.1 原子炉施設の位置

核変換物理実験施設は、現時点での施設配置案を基にすると、JRR-4 の南南東約 280m、NUCEF の西南西約 330m に位置する。排気筒から敷地境界までの最短距離は約 100m となる見込みである。(Fig.5.1)

(注：位置については大強度陽子加速器計画施設全体の配置が最終的に確定した時点で決まる。上記の位置は暫定のものである。)

5.2 原子炉施設の一般構造

(イ) 耐震構造

核変換物理実験施設の重要な建物・構築物は原則として岩盤に支持させる。施設の建物、構築物、機器、配管等は地震により安全機能が喪失した場合の影響を考慮し、A、B 及び C クラスに分類し、各々の重要度分類に対応した地震力に耐え得る設計とする。

(ロ) その他の主要な構造

炉室、燃料取扱室、燃料貯蔵庫、制御室、排風機室、電気室等、施設の主要な構造は実験棟に配置される。実験棟には加速器施設である陽子ビーム輸送トンネルが接続される。実験棟と陽子ビーム輸送トンネルの境界にはエクスパンジョンジョイントを設け、各々は独立した基礎を有する。実験棟は鉄筋コンクリート建家である。(Fig.5.2 及び Fig.5.3)

原子炉本体である核変換物理実験装置は、1 次容器（耐爆構造）及び 2 次容器（気密構造）からなる格納容器に収納される。

5.3 原子炉本体の構造及び設備

(イ) 炉心

(1) 構造

a. 炉心構造

本実験装置は、水平 2 分割型の臨界実験装置であり、分割された各 1/2 格子管集合体は四角柱格子管 (SUS304、外辺寸法：約 55mm × 55mm、長さ：約 1,320mm、板厚 1mm) を直方体状 (51 行 × 51 列) に積み重ねたものである。各々の格子管には、炉心を形成するための燃料板及び構造材、冷却材、減速材等の模擬板を任意に装填できる炉心物質装填用引き出し (SUS304、内辺寸法：約 51mm × 51mm、長さ：約 670mm、板厚 0.8mm) を挿入する。

各々の 1/2 格子管集合体はテーブル上に固定されており、テーブルの一つはベットと一体構造となっているが、もう一つのテーブルはテーブル駆動機構によってベット上を移動できる。各々のテーブルには 1/2 格子管集合体を構成するための締付枠及び制御安全棒駆動機構の支持板及び支持枠が設けられている。(Fig.5.4)

通常この 2 つの 1/2 格子管集合体は分離されており (間隔 2,000mm) 、運転時には近接して密着する。制御安全棒は他の炉心物質装填用引き出しと同様に、内部に

燃料板並びに模擬板等を装填した引き出しであり、格子管内を水平方向に炉心に挿入及び引き抜かれる。

各々の 1/2 格子管集合体の中心格子管（5 行 × 5 列）は実験用機器に置換するために引き抜くことができる構造となっている。

b. 炉心周辺機器

移動側 1/2 格子管集合体にはテーブル駆動機構が取り付けられ各 1/2 格子管集合体後方には制御安全棒駆動機構が取り付けられている。

集合体内及び周辺には、陽子ビーム輸送機構、パルス中性子発生装置、各種検出器、検出器駆動機構、放射性同位元素中性子源及び駆動機構、格子管集合体冷却設備が配置されている。

また、1/2 格子管集合体を分離した状態で、炉心物質装填用引き出しの装荷作業を行うための作業台（上下方向移動）がおかれ。作業台は装置運転時には取り除かれる。

(2) 燃料体の最大挿入量

種類	形状	最大挿入量
濃縮ウラン	金属、酸化物、窒化物 薄板状、ピン状	約 4,000kg (^{235}U 800kg)
プルトニウム	合金 薄板状	$^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ 約 250kg
天然ウラン	金属 薄板状及びブロック	約 30ton
劣化ウラン	金属及び酸化物 薄板状及びブロック	約 30ton

(3) 主要な核的制限値

- a. 最大過剰反応度 0.8 ドル
- b. テーブル密着時における体系の未臨界度 $0.5\% \Delta k/k$ 以上

(4) 主要な熱的制限値

- a. 最高熱出力 500W
- b. 使用温度 炉心 40°C 以下
- c. 年間積算出力量 50kW·h

(口) 燃料体

本装置用燃料要素は、濃縮ウランの金属、酸化物及び窒化物並びにプルトニウムの合金である。希釈用として天然ウラン金属及び劣化ウラン酸化物を用いる。形状は薄板状であるが一部にピン状のものを用いる。ブランケット部には天然ウラン金属及び劣化ウラン金属のブロックを使用する。

(1)燃料材の種類

- a. 濃縮ウラン燃料（金属、酸化物、窒化物）
 - ^{235}U 濃縮度 20%及び 93%
 - 形状 薄板状及びピン状
- b. Pu-Al (1.3w/o) 合金燃料
 - $^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ 同位元素比 95~54%
 - 形状 薄板状
- c. 天然ウラン金属燃料
 - ^{235}U 含有率 0.714%
 - 形状 薄板状及びブロック状
- d. 劣化ウラン燃料（金属、酸化物）
 - ^{235}U 含有率 0.714%以下
 - 形状 薄板状及びブロック状

(2)被覆材の種類

- a. ウラン金属燃料
 - 約 15 μm のニッケルで被覆を行う。
- b. プルトニウム燃料
 - 0.25 及び 0.20mm 厚 ステンレス鋼 (SUS304-L)

(3)燃料要素の構造

原子炉炉心の模擬を物質組成についても、原子炉の形状についても広い範囲に行
い得るように主として薄板状のものを用い、一部にピン状のものを使用する。なおブ
ランケット部を構成するために主としてブロックを使用する。一部のものには、実
験孔を設定するために中央に直径 20.0mm 又は 26.0mm の孔があけられている。

- a. 薄板状燃料要素
 - i 基準外辺寸法 (mm)
 - 100×50、50×50、25×50
 - ii 基準厚さ (mm)
 - 6.2、3.1、1.5
- b. ピン状燃料要素
 - i 基準外径 (mm)
 - 12、10、8、6
 - ii 基準長さ (mm)
 - 200、100、50
- c. ブロック状燃料要素
 - i 基準外辺寸法 (mm)
 - 50×50
 - ii 基準長さ (mm)
 - 200、100、50

(4)燃料集合体の構造

前記燃料要素と模擬物質（冷却材を模擬するために種々の密度の鉛、ビスマス、ア
ルミニウム、ナトリウム等を、構造材を模擬するためにステンレス鋼、ジルコニア

ム等を、酸化物燃料、窒化物燃料、炭化物燃料、合金燃料を模擬するために含酸素化合物、含窒素化合物、黒鉛、ジルコニウム等を、減速材を模擬するために含水素化合物等を、核分裂生成物を模擬するために種々の元素・核種を前記規格の薄板状又はブロック状としたもの)を適当に組み合わせて、炉心物質装填用引き出しにつめて炉心に装荷する。また、ピン状燃料を装荷するためにピン装填孔を持つ特殊な模擬物質を用いる。

(5) 最高燃焼度

年間積算出力量は 50kW·h 以下であるので、燃料の燃焼は十分無視し得るほど小さい。

(ハ) 減速材及び反射材の種類

該当事項なし

(二) 原子炉容器

該当事項なし

(ホ) 放射線遮へい体の構造

本装置では、1次容器及び2次容器の壁が放射線遮へい体となっており、集合体本体には遮へい体はない。

1次容器は、2次容器底面の上に構築される鉄筋コンクリート造の構造体で、内法底面 17m×12m、内法高さ 13.8m の直方体をしており、壁、天井の厚さは 150cm、床の厚さは 200cm となっている。

2次容器は、内法底面 23m×18m、内法高さ 18.2m の直方体をしており、鉄筋コンクリート造で、壁厚は 50cm となっている。

(ヘ) その他の主要な構造

パルス中性子発生装置、起動用中性子源及び核破碎中性子発生用のターゲット

5.4 核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設の構造及び設備

燃料要素は燃料要素収納容器に収納し、燃料貯蔵庫に格納して管理する。

ウラン燃料要素の炉心装填用引き出しへの装填は、燃料取扱室の燃料装填用デスクを行い、これを燃料移送設備で集合体まで移送し、燃料装荷装置又は作業員が集合体への装荷を行う。

使用後の燃料要素は燃料移送装置にて燃料取扱室に移送され燃料装填用デスクで炉心装填用引き出しから出して燃料要素収納容器に収納して燃料貯蔵庫に格納する。

Pu 燃料収納容器の開封及び Pu 燃料要素の炉心物質装填用引き出しへの装填・装脱は全て Pu 燃料取扱・装填用フード内にて行われる。

(イ) 核燃料物質取扱い設備の構造

(1) 燃料装填用デスク

ウラン燃料要素を炉心装填用引き出しに装填するために燃料取扱室に設置する。

(2) 燃料移送設備

台車牽引式コンベア、引き出し横送り装置、引き出し昇降装置からなる。

(3)燃料装荷装置

炉心装填用引き出しを集合体へ装荷するため、燃料装荷装置を炉室に設置する。

(4)Pu燃料取扱・装填用フード

Pu燃料取扱時の汚染管理のため、Pu燃料取扱・装填用フードを燃料移送設備に隣接して設置する。

(5)燃料装荷用生体遮へい板

炉心物質装填用引き出しを集合体に作業員が装荷する際、集合体に装荷された燃料より発せられる γ 線及び中性子線による被ばくを避けるため、両1/2集合体全面に移動可能な生体遮へい板を設ける。

(ロ)核燃料物質貯蔵設備の構造及び貯蔵能力

(1)構造

a. 濃縮ウラン燃料収納容器

鋼製鳥籠状容器で、中心の小容器に少量ずつ濃縮ウラン燃料要素（ ^{235}U 量1.5kg以下）が収納され、他の濃縮ウラン要素と40cm以上離れるようになっている。

b. Pu燃料収納容器

鋼製鳥籠状容器で、中心の小容器（密閉型）に少量ずつPu燃料要素が収納され、他の濃縮ウラン要素と40cm以上離れるようになっている。

c. 燃料貯蔵棚

鋼製で貯蔵庫の壁に固定されており、収納容器を格納する。

d. 燃料貯蔵庫

鉄筋コンクリート構造で無窓施錠扉つき。

(2)貯蔵能力

a. 濃縮ウラン燃料

^{235}U 約800kg

b. 天然ウラン及び劣化ウラン燃料

天然ウラン換算 約60ton

c. プルトニウム燃料

$^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}$ 約330kg

5.5 原子炉冷却系統施設の構造及び設備

(イ)一次冷却設備

該当事項なし

(ロ)二次冷却設備

該当事項なし

(ハ)非常用冷却設備

該当事項なし

(ニ)その他の主要な事項

(1)格子管集合体冷却設備

プルトニウム燃料装荷時に、プルトニウムの α 崩壊による炉心の温度上昇を抑えるため、炉心部を空気で強制冷却するものである。

冷却材の種類 : 空気

主要な機器及び構造 : 送風機、高性能フィルター、冷却室、ダンパー

5.6 計測制御系統施設の構造及び設備

(イ)計装

(1)核計装の種類

核計装系統設備は8チャンネルの中性子監視系よりなる。これらは次の3系統に分けられる。

a. 起動系

フィッシュンチェンバー	対数計数率計	2チャンネル
-------------	--------	--------

b. 運転系

非補償型電離箱	炉周期付き対数出力計	2チャンネル
	線型出力計	2チャンネル

c. 安全系

非補償型電離箱	線型出力計	2チャンネル
---------	-------	--------

(2)その他の主要な計装

- a. 炉心温度計
- b. テーブル位置表示計
- c. 制御安全棒シリンダー圧力計

(口) 安全保護回路

安全保護回路は、警報及びインターロック等の機能をはたす。

(1)原子炉停止回路の種類

装置の異常が発生した場合、その条件によりスクラム回路が作動し、装置を緊急停止する。この条件を次表に示す。

作動条件	信号発生装置
(a) 短炉周期	炉周期計
(b) 高中性子束	出力計
(c) 制御安全棒シリンダー圧力異常	圧力スイッチ
(d) テーブル密着後の離脱	テーブル密着スイッチ
(e) 地震	地震計
(f) 核計装高圧電源異常	高圧電源トリップ回路
(g) 停電	停電用リレー
(h) 炉室扉開放	炉室扉スイッチ
(i) 燃料送管ハッチ開放	ハッチスイッチ
(j) 補助出入り口開放	補助出入口スイッチ
(k) 換気系バタフライバルブ開放	バルブスイッチ
(l) 手動スクラム	スクラムボタン（制御室、炉室）
(m) 格子管集合体冷却系統の動作異常	冷却空気流量計
(n) 隔離弁開放*	隔離弁スイッチ
(o) ビームシャッター開放*	ビームシャッタースイッチ

*) FCA には無い項目

スクラム動作は総ての制御安全棒の引き抜き及び移動テーブルの後退である。

(2)その他の主要な安全保護回路

その他の安全保護回路及び設備としては、警報回路及び起動インターロック回路が設け

られている。

a. 警報回路

下記の場合、警報指示灯、ブザー又はベル等によって警報を発する。

- (a) 短炉周期
- (b) 起動用チャンネル出力低下
- (c) 運転開始
- (d) スクラム作動
- (e) 移動テーブル停止インターロック作動
- (f) 高炉心温度
- (g) 炉室 α モニター高レベル
- (h) 陽子ビーム導入実験開始

b. 起動インターロック回路

起動インターロック回路は、装置の安全操作を確保するために各種操作の手順を規制するものである。

(a) テーブルの高速駆動

- (i) 中性子源が炉内の規定の位置に挿入されていること。但し、燃料固有の中性子源が十分に存在する場合はバイパス可。
- (ii) 中性子束が規定値以上であること。
- (iii) 移動テーブルが高速駆動区間にあること。
- (iv) 作業台が待機位置にあること。
- (v) 安全棒が完全に挿入されていること。
- (vi) 制御棒が完全に引き抜かれていること。
- (vii) スクラムがいつでも動作しうる状態になっていること。

(b) テーブルの中速駆動

移動テーブルが中速駆動区間にあり、且つ(a)の(i)、(ii)、(v)、(vi)、(vii)の条件を満足していること。

(c) テーブルの低速駆動

移動テーブルが低速駆動区間にあり、且つ(a)の(i)、(ii)、(v)、(vi)、(vii)の条件を満足していること。

(d) 移動テーブル停止インターロック

各々の速度区間において、前進中のテーブルは、次のような場合に一旦停止する。

- (i) (a)の条件(i)、(ii)、(v)の少なくとも一つが満足されなくなったとき。
- (ii) 炉周期がスクラム設定値より大きい適当な値より短くなったとき。

(e) 制御棒の挿入

- (i) 移動側 1/2 集合体が前進中でないこと。
- (ii) 且つ両 1/2 集合体が密着していること。
- (iii) (a)の条件(ii)、(v)、(vii)が満足されていること。

但し、制御棒の挿入は、一時に一組のみが可能である。

(f) 安全棒の挿入

両 1/2 集合体の距離が 2,000mm まで分離していること。

c. インターロックバイパス

インターロックのうちいくつかは実験目的に応じてバイパスすることが可能であり、バイパスのためのキースイッチが設けられている。

バイパス項目

(a)原子炉停止回路

- i) 短炉周期
- ii) 炉室扉開放
- iii) 燃料送管ハッチ開放
- iv) 換気系バタフライバルブ開放
- v) 格子管集合体冷却流量異常
- vi) 隔離弁開放
- vii) ビームシャッター開放

(b)インターロック回路

へ、(口)、(2)、bのうち、(a)の条件(i)、(c)の条件(vi)、(e)の(ii)及び(f)。

d. 移動テーブル駆動機構

移動テーブルの前進駆動における高速及び中速駆動をホットレール方式とし、移動テーブルが中速度のまま低速領域を駆動することを禁止する。

(ハ) 制御設備

反応度制御装置は、制御安全棒及び駆動機構並びに移動テーブル及び駆動機構から構成されている。制御安全棒のうち、2本は制御棒として使用し、残りは安全棒として使用する。

(1)制御材の個数及び構造

a. 制御安全棒

- (a)制御材： 燃料板及び模擬物質板を組み合わせたもの
- (b)個数 : 8~20 本
- (c)構造 : 他の炉心物質装填用引き出しと同様に燃料板及び模擬物質板を組み合わせて装填したステンレス鋼製引き出し、あるいはこれらの2本が同時に挿入、引き抜きができるように連結したもの。

寸法	長さ	1,000mm
	内法巾	約 49mm
	内法高さ	約 51mm
	板厚	1.5~3mm

b. 移動テーブル

- (a)制御材： 該当事項なし
- (b)個数 : 1台
- (c)構造 : 1/2格子管集合体がテーブルに固定されており、ベッド上を移動して、固定側1/2格子管集合体に密着するようになっている。

(2)制御材駆動設備の個数及び構造

a. 制御安全棒

- (a)個数 : 8~10 組
- (b)構造 : 制御安全棒用の引き出しの通常の挿入及び引き抜きはモーターにより行い、スクラムの際の引き抜きは圧縮空気の力により行う。この圧縮空気の圧力は、常時制御安全棒に連結されているピストンに加えられていて、スクラムの際に駆動軸を保持している電磁マグネ

ットの電流が切られる。

位置表示は 0.1mm の精度で制御盤上に数値的に表示される。

ストローク	600mm
最大挿入速度	1mm/s
スクラム信号が入ってから動き始めるまでの時間	50ms 以下
動き始めてから全行程の 80%	
引き抜かれる時間	200ms 以下

b. 移動テーブル

(a) 個数 : 1 台

(b) 構造 : 移動テーブルの送りは、ねじとラック方式が用いられ、通常の駆動源は交流電動機で行われる。スクラムの際のテーブル後進については非常用駆動源として直流電動機を備えていて、通常駆動源不動作時にも確実に 1/2 集合体の分離が行われて自動的に最大間隔まで後退する。

駆動速度は、移動テーブルの位置により前進（接近）時は 3 段切り換えとなっており、速度切り替え位置では必ず自動的に停止し、手動によって改めてスイッチを入れなければそれより前進しないようになっている。

後進（分離）時は単一速度である。

テーブル間隔	表示計目盛	表示方式
0~2,000mm	5mm	線型アナログ
0~ 300mm	0.1mm	デジタル
0~ 100mm	0.01mm	デジタル

テーブル最大間隔 2,000mm

移動速度

テーブル間隔	速度	備 考
前進 2,000~ 500mm	300mm/min	高速領域
500~ 100mm	150mm/min	中速領域
100~ 0mm	15mm/min	低速領域
後退 0~2,000mm	780mm/min	高速後退

スクラム信号が入ってから 100mm 以上

分離するまでの時間

10s 以下

(3) 反応度制御能力

a. 反応度抑制効果 : 制御棒 0.5%Δk/k 以上
安全棒 2 %Δk/k 以上

b. 反応度附加率 : 0.01%Δk/k/s 以下

(二) 非常用制御設備
該当事項なし

(ホ) その他の主要な事項
該当事項なし

5.7 放射性廃棄物の廃棄施設の構造及び設備

管理区域の換気は空気調和装置内でフィルターによりろ過・除塵され冷却器または加熱器により適当な温度、湿度に処理された空気を給気し、排気は空気ろ過装置でろ過され、スタックから大気中に放出する。

管理区域の排水は、放射性汚染排水系として廃液タンクに貯蔵し、モニターのうえ許容濃度以下の場合は雑排水系に放流し、許容濃度以上の場合は廃棄物処理場に運搬し、処理する。

管理区域内で生じた固体廃棄物は、廃棄物処理場に運搬し、処理する。

(イ) 気体廃棄物の廃棄設備

廃棄設備は炉室および付属建家に設けられている。

炉室	換気装置 フィルター 気密バタフライバルブ
燃料取扱室及び燃料貯蔵庫	換気装置 フィルター
排気口	1式 地上 約 55m

(ロ) 液体廃棄物の廃棄設備

廃液タンク 約 5m³ × 2基

(ハ) 固体廃棄物の廃棄設備

東海研究所の廃棄物処理場へ運搬。

5.8 放射線管理施設の構造及び設備

屋内管理としては、管理区域出入口に境界を設け、作業靴および作業衣を管理区域と区別して行う。また、管理区域内にはエリアモニターが設置され、管理区域出入口には汚染検査室および汚染除去室が設けられている。

屋外管理としては、排気系にダストモニターが設置され、東海研究所およびその周辺にモニタリングステーションおよびモニタリングカーが設置されている。

(イ) 屋内管理用の主要な設備の種類

施設内には次に示すモニターが設置されている。いずれも警報発生装置を有していて、その表示は検出器の地点と制御室の放射線モニター制御盤に集中指示される。

分 類	位置または対象	線 種
-----	---------	-----

エリアモニター	炉室	γ 、n
	燃料取扱室	γ
ダストモニター	炉室	α 、 β
	Pu燃料貯蔵庫 Pu燃料取扱・装填用フード	α
臨界モニター	Pu燃料貯蔵庫	γ またはn
	燃料取扱室	γ またはn

この他に、管理区域出入口に設けられた汚染検査室にハンドフットモニターが設置され、管理区域入口に個人管理用計測器が設けられている。

汚染除去室には、シャワー、洗面台および除染器材が設けられている。

(ロ)屋外管理用の主要な設備の種類

排気系に次に示すモニターが設置されている。

分類	位置または対象	線種
ダストモニター	スタックダスト	α 、 β

5.9 原子炉格納施設の構造及び設備

格納容器は二重構造となっており、1次容器及び2次容器から成っている。1次容器は仮想事故における爆圧に耐え、飛散物の障壁となるような構造で、2次容器は静圧に耐え、気密性を保持する構造となっている。

(イ)構造

a. 1次容器

内法	:	17m×12m×13.8m ^H の直方体
天井壁厚	:	150 cm
床厚	:	200 cm

鉄筋コンクリート造り

b. 2次容器

内法	:	23m×18m×18.2m ^H の直方体
----	---	---------------------------------

2次容器は内面に 6 mm 厚鋼板をライニングした 50 cm 厚の鉄筋コンクリート造りとなっている。

(ロ)設計圧力および設計温度並びに漏洩率

a. 1次容器

- (a)設計圧力 : TNT 約 100 kg の耐爆圧
- (b)設計温度 : 該当事項なし
- (c)漏洩率 : 該当事項なし

b. 2次容器

- (a)設計圧力 : 0.18MPa
- (b)設計温度 : 130 °C
- (c)漏洩率 : 内圧 0.16MPa 静圧のとき 2% / 24 時間以下

(ハ)その他主要な事項

a. 非常用アルゴンガス放出設備

不測の事故による原子炉燃料等の金属火災を消火するために、アルゴンガスを1次容器内に放出し、窒息消火を行うものである。

b. 空気調和機

換気能力	1 次容器	2,480 m ³ /h
	2 次容器	5,500 m ³ /h

c. クレーン

炉室

5.10 その他原子炉の附属施設の構造及び設備

(イ) 非常用電源設備の構造

商用電源の停電用として充電器付き蓄電池及びガスタービン発電機が設けられている。

蓄電池 : 100V 80Ah

ガスタービン発電器 : 150kVA 1台

- 主要な給電負荷 : 1)移動テーブル非常後退用電動機
 2)制御盤の一部（制御用電源、リレー、表示ランプ）
 3)モニター、警報装置
 4)インターフォン
 5)停電時用照明
 6)消火ポンプ
 7)格子管集合体冷却設備
 8)燃料取扱室フード
 9)空調制御盤
 10)核燃料物質防護設備

(ロ) 主要な実験設備の構造

a. 陽子ビーム輸送機構

陽子加速器施設から集合体の中央付近に置くターゲットまでパルス状の陽子ビームを導入し、核破碎反応により中性子を発生させるものである。

- (1) 陽子ビームの最大出力 : 10W (平均出力)
- (2) 体系の未臨界度 : 2%以上
- (3) インターロック : 炉室扉開放によるビーム停止
制御棒挿入禁止

6. 安全設計の考え方

核変換物理実験施設の安全性を検討するために、NUCEFにおける設置許可申請書の添付書類八（原子炉施設の安全設計に関する説明書）の書式を参考にして、安全設計の考え方をまとめる。但し、現在は施設の概念検討段階であるため、施設の詳細な仕様については不確定な箇所が多数ある。また、FCAの仕様及びデータを用いている部分が多いいため、今後変更する箇所が多数あると考えられる。

本報告で検討するのは、「方針」の部分及び核変換物理実験施設と加速器施設の連結の考え方で重要となる「陽子ビーム輸送機構」の部分である。以下の表記中で核変換物理実験施設で特徴的な事項は□で囲んだ。

核変換物理実験施設は「6.1 安全設計の基本方針」のもとに安全設計を行い、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下「原子炉等規制法」という。）その他関係法令の要求を満足するとともに、「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針」⁽⁷⁾の内の該当する部分に適合する設計とする。

核変換物理実験施設は、高速炉臨界実験装置FCAを参考にした臨界実験装置であり、発電用原子炉施設や研究用原子炉施設とは基本的に構造や運転形態が異なり、次のような特徴を有している。

- (1) 板状ウラン燃料と模擬物質板を組み合わせることによって多様な燃料組成を模擬し、模擬対象の領域又は炉心全体の核特性を測定することを目的とした臨界実験装置である。
- (2) 未臨界体系において陽子ビームを用いた加速器駆動システムの実験を行う。
- (3) 出力が小さいので核分裂生成物の蓄積量が極めて少ない。また、核分裂によって生じる熱を除去するための冷却設備を持たない。

しかしながら、原子核分裂の連鎖反応を起こさせ、これを制御するという原子炉の基本的な原理、計測制御、放射性廃棄物の管理、放射線管理などについては、水冷却型試験研究用原子炉施設と同様である。このため、「水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針」⁽⁸⁾を参考にして、「核変換物理実験施設の安全設計方針」を作成した。この方針に適合するように核変換物理実験施設を設計する。

6.1 安全設計の基本方針

- (1) 平常運転時において東海研究所周辺の一般公衆及び従事者に対する放射線被ばくについては、原子炉等規制法に定められている許容基準を超える放射線被ばくを与えないようにするとともに、合理的に達成できる限り低くするように設計する。
- (2) 核変換物理実験施設は、設計、製作、建設及び運転を通じて信頼性の高いものとし、運転員の誤操作等による異常状態に対しては、警報により運転員が措置し得るとともに、もし、これらの修正動作が得られない場合にも、安全保護系の動作により、過渡変化が安全に終止するように設計する。
- (3) 放射性物質の放散を防止するための設備を設け、万一事故が発生した場合にも東海研究所周辺の一般公衆に著しい放射線被ばくのリスクを与えないように設計する。
- (4) 核変換物理実験施設の設置される場所の地震、気象、水理等の自然現象及び火災等の人為事象によって施設の安全性が損なわれないように設計する。
- (5) 核変換物理実験施設に陽子ビームを供給する加速器施設における故障、火災等の

異常事象によって施設の安全性が損なわれないように設計する。

6.2 核変換物理実験施設の安全設計方針

6.2.1 用語の定義

(1) 「核変換物理実験施設」及び「核変換物理実験装置」

「核変換物理実験施設」とは、臨界実験及び未臨界実験を行う原子炉施設であって、「核変換物理実験装置」とは同施設の原子炉をいう。

(2) 「安全上重要な構築物、系統、及び機器」

「安全機能」とは、原子炉施設の安全性を確保するために必要な構築物、系統又は機器の有する機能であって、次に掲げるものに分類される。

(i) その喪失により、原子炉施設を異常状態に陥れ、もって一般公衆ないし放射線業務従事者に過度の放射線被ばくを及ぼすおそれのあるもの。

(ii) 原子炉施設の異常状態において、この拡大を防止し、又はこれを速やかに収束せしめ、もって一般公衆ないし放射線業務従事者に及ぼすおそれのある過度の放射線被ばくを防止し、又は緩和するもの。

(3) 「安全機能の重要度」

「安全機能の重要度」とは、原子炉施設の安全性確保の見地からの安全機能の重要性の度合いをいう。

(4) 「原子炉停止系」

「原子炉停止系」とは、臨界又は臨界超過の状態から炉心に負の反応度を投入することにより、炉心を臨界未満にし、かつ、臨界未満を維持するための機能を備えるよう設計された設備をいう。

(5) 「反応度制御系」

「反応度制御系」とは炉心の反応度を制御することにより、原子炉の出力、燃焼、核分裂生成物等の変化に伴う反応度変化を調整するよう設計された設備をいう。

(6) 「安全保護系」

「安全保護系」とは、原子炉設備の異常状態を検知し、必要な場合、原子炉停止系、工学的安全施設等の作動を直接開始させるよう設計された設備をいう。

(7) 「単一故障」

「単一故障」とは、単一の原因によって一つの機器が所定の安全機能を失うことのいい、従属要因に基づく多重故障を含む。

(8) 「動的機器」

「動的機器」とは、外部入力によって能動的に所定の機能を果たす機器をいう。

(9) 「多重性」

「多重性」とは、同一の機能を有する同一の性質の系統又は機器が二つ以上あることをいう。

(10) 「多様性」

「多様性」とは、同一の機能を有する異なる性質の系統又は機器が二つ以上あることをいう。

(11) 「独立性」

「独立性」とは、二つ以上の系統又は機器が設計上考慮する環境条件及び運転状態において、共通要因又は従属要因によって、同時にその機能が阻害されないことをいう。

(12) 「通常運転時」

「通常運転」とは、計画的に行われる起動、停止、出力運転、燃料取替等のような原子炉施設の運転であって、その運転状態が所定の制限内にあるものをいう。

(13) 「異常状態」

「異常状態」とは、通常運転を逸脱させるような、何らかの外乱が原子炉施設に加えられた状態であって、運転時の異常な過渡変化及び事故をいう。

(14) 「運転時の異常な過渡変化」

「運転時の異常な過渡変化」とは、原子炉設計の寿命期間中に予想される機器の单一の故障若しくは誤動作又は運転員の单一の誤操作、及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって生ずる異常な状態をいう。

(15) 「事故」

「事故」とは、「運転時の異常な過渡変化」を超える異常な状態であって、発生する頻度はまれであるが、原子炉施設の安全設計の観点から想定されるものをいう。

6.2.2 安全設計方針

方針1. 準拠規格及び基準

安全機能を有する構築物、系統及び機器は、設計、材料の選定、製作及び検査について、それらが果たすべき安全機能の重要度を考慮して、適切と認められる次の規格及び基準によるものであること。

- (1) 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律(昭和 32.6.10、法律第 166 号)
- (2) 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律施行令（昭和 32.11.21、政令第 324 号）
- (3) 試験研究の用に供する原子炉等の設置、運転等に関する規則(昭和 32.12.9、総理府令第 83 号)
- (4) 試験研究の用に供する原子炉等の設計及び工事の方法の技術基準に関する総理府令（昭和 62.3.25、総理府令第 11 号）
- (5) 原子炉の設置、運転等に関する規則などに基づき、許容被ばく線量等を定める件 (昭和 35.9.30、科学技術庁告示第 21 号)

等の法令に基づくとともに、原則として次に示す国内の法令、規格、基準などに準拠し、又はこれらを参考とするものとする。

- 1) 建築基準法
- 2) 労働基準法
- 3) 労働安全衛生法
- 4) 消防法
- 5) 高圧ガス取締法
- 6) 放射線障害防止法
- 7) 電気設備に関する技術基準を定める省令
- 8) 日本工業規格 (JIS)
- 9) 日本電機工業会標準規格
- 10) 日本電気学会電気規格調査会標準規格 (JEC)
- 11) 日本建築学会各種構造設計基準 (JASS) 及び指針
- 12) その他

- (6) 国内法規、規格、基準において規定されないものについては、必要に応じ臨界実験装置に対する方針等を定めてこれを適用するか、あるいは十分使用実績があり、かつ信頼性の高い、次に示す国外の規格、基準等を参考とする。
- 1) ASME 規格
 - 2) ANSI 基準
 - 3) ASTM 規格
 - 4) IEEE 基準
 - 5) その他

方針 2. 自然現象に対する設計上の考慮

1. 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能の重要度及び地震によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、耐震設計上の区分がなされるとともに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計であること。
2. 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、地震以外の想定される自然現象によって原子炉施設の安全性が損なわれない設計であること。重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器は、予想される自然現象のうち最も苛酷と考えられる条件、又は自然力に事故荷重を適切に組み合わせた場合を考慮した設計であること。

設計条件は次の事項を考慮して定めること。但し、NUCEF 当時のデータである。

(1) 風（台風）

敷地附近で観測された瞬間最大風速は、水戸地方気象台の観測記録（1937年～1979年）によれば 44.2 m/s (1939年8月6日) である。しかしながら、風荷重に対する設計は、建築基準法に基づいて行う。

(2) 洪水

敷地は那珂台地にあり地形的にみて洪水による被害は考えられない。

(3) 積雪

水戸地方気象台の観測記録（1897年～1979年）によれば積雪量の日最大値は 32 cm (1945年2月26日) であるが、茨城県建築基準法関係条例（積雪 40 cm 相当）に基づき積雪単位重量指定値にて設計を行う。

(4) 津波、高潮

敷地付近で過去における津波、高潮による被害の記録はない。鹿島灘沿岸に近い地形の例として、十勝沖地震の際の浦河における記録によれば潮位約 5 m 、新潟地震の際の直江津付近海岸における約 3 m の津波が観測されている。高潮は台風等のときの強風による表面水の吹きよせ現象と気圧の低下による表面の上昇効果の重畠と考えられている。伊勢湾台風のとき高潮による水位上昇は最高 3.4 m であったが直線的海岸で高潮による被害が問題になった例はない。

したがって最悪の場合を仮定しても当海岸では津波による水位上昇は 5 m 、高潮のそれは 2 m 程度であると考えられる。なお、平均海面と潮位差の最大は 1.5 m 程度と考えられるので、これらの現象が各々満潮時と重なったとしても津波の場合 6.5 m 、高潮の場合 3.5 m 程度の潮位上昇にとどまるものと考えられる。また、異常潮位については高々 40 cm 程度と実測されている。核

変換物理実験施設は海岸から約500m離れた海拔約15mの台地の地下に建設されるため、津波、高潮、異常潮位による被害及び波浪の影響を受けるおそれはない。

(5) 凍結

敷地付近の水戸地方気象台での記録(1897年、1979年)によれば、最低気温は、-12.7°C(1952年2月5日)、月平均最低気温は-3.1°C(1月)であるが、屋外機器で凍結のおそれのあるものは必要に応じて上記の最低気温に適切な余裕を持った設計値で凍結防止対策を行う。

(6) 地下水

施設の地下部分への地下水の浸入を防ぐための対策を行う。

以上のような自然状況を鑑み、安全機能を有する構築物、系統及び機器の設計条件を設定し、予想される自然条件の最も苛酷なものに対しても、その安全機能を失うことがないよう設計する。

方針3. 外部人為事象に対する設計上の考慮

1. 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、想定される外部人為事象によって、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。
2. 原子炉施設は、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近等に対し、これを防御するため、適切な措置を講じた設計であること。

方針4. 内部発生飛来物に対する設計上の考慮

安全機能を有する構築物、系統及び機器は、原子炉施設内部で発生が想定される飛来物に対し、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。

方針5. 火災に対する設計上の考慮

原子炉施設は、火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の3方策を適切に組み合わせて、火災により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。

方針6. 環境条件に対する設計上の考慮

安全機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能が期待されているすべての環境条件に適合できる設計であること。

方針7. 運転員操作に対する設計上の考慮

原子炉施設は、運転員の誤操作を防止するための適切な措置を講じた設計であること。

方針8. 信頼性に対する設計上の考慮

1. 安全性機能を有する構築物、系統及び機器は、その安全機能の重要度に応じて、十分に高い信頼性を確保し、かつ、維持し得る設計であること。
2. 重要度の特に高い安全機能を有する系統については、その構造、動作原理、果たすべき安全機能の性質等を考慮して、多重性又は多様性及び独立性を備えた設計であること。
3. 前項の系統は、その系統を構成する機器の单一故障に加え、商用電源が利用で

きない場合においても、その系統の安全機能が達成できる設計であること。

方針 9. 試験可能性に関する設計上の考慮

安全機能を有する構築物、系統及び機器は、それらの健全性及び能力を確認するために、その安全機能の重要度に応じ、適切な方法により、原子炉の運転中又は停止中に試験又は検査ができる設計であること。

方針 10. 炉心設計

1. 炉心は、それに関連する原子炉停止系、計測制御系及び安全保護系の機能とあいまって、通常運転時及び運転時の異常な過度変化時において、燃料の許容設計限度を超えることのない設計であること。
2. 炉心を構成する燃料以外の構成要素及び炉心近辺に位置する構成要素は、通常運転時及び異常状態において原子炉の安全停止を確保し得る設計であること。

方針 11. 燃料要素

1. 燃料要素は、原子炉内における使用期間中に生じ得る種々の変化を考慮しても、その健全性を失うことのない設計であること。
2. 燃料要素は、輸送及び取扱い中に過度の変形を生じない設計であること。

方針 12. 試験用燃料要素及び試験に関する設計上の考慮

1. 炉心への試験用燃料要素の装荷は、その数量を限定する設計であること。
2. 試験用燃料要素は、計画された範囲内でその健全性を喪失しても、燃料要素の健全性に影響を与えない設計であること。
3. 試験用燃料要素は、原子炉施設の設計とあいまって、運転時の異常な過渡変化時において、原子炉の安全性を損なわない設計であり、また、事故時においても試験用燃料要素の破損等により、原子炉の安全な停止に支障を与えない設計であること。
4. 原子炉施設は、試験用燃料要素から放出される放射性物質を加えても、環境への放射性物質の放出量を合理的に達成できる限り低く抑える設計であること。
5. 試験用燃料要素は、輸送及び取扱い中に過度の変形を生じない設計であること。

方針 13. 反応度制御系

1. 反応度制御系は、通常運転時に予想される温度変化、実験物の状態変化等による反応度変化を調整し、所要の運転状態に維持し得る設計であること。
2. 制御棒は、炉心への誤挿入を防止する設計であるとともに、その最大反応度添加率は、原子炉停止系の停止能力とあいまって、予想される制御棒の異常な挿入等に対して、燃料の供用設計限度を超えない設計であること。

方針 14. 原子炉停止系の独立性

原子炉停止系は、運転状態から炉心を臨界未満にでき、かつ、臨界未満に維持できる少なくとも二つの独立した系統を有する設計であること。

方針 15. 制御・安全棒による原子炉の停止余裕

原子炉停止系のうち制御・安全棒による系統は、運転状態において、反応度価値の最も大きい制御・安全棒1本が完全に炉心外に挿入された状態から引き抜けないときでも、炉心を臨界未満にできる設計であること。

方針 16. 原子炉停止系の停止能力

原子炉停止系に含まれる独立した系統のうち少なくとも一つは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料の許容設計限界を超えることなく、速やかに炉心を臨界未満にでき、かつ、原子炉停止系に含まれる独立した少なくとも一つは設計上考慮する最も低い温度で炉心を臨界未満に維持できる設計であること。

方針 17. 原子炉停止系の事故時的能力

事故時において、原子炉停止系に含まれる独立した系統の少なくとも一つは炉心を臨界未満にでき、また、原子炉停止系に含まれる独立した系統の少なくとも一つは炉心を臨界未満に維持できる設計であること。

方針 18. 原子炉停止系と反応度制御系の共用

原子炉停止系と反応度制御系を全体的に共用する場合には、反応度制御系の想定される故障も考慮して、原子炉停止系の所要の信頼性及び能力を損なうことのない設計であること。

方針 19. 電源喪失に対する設計上の考慮

原子炉施設は、商用電源喪失に対して、原子炉を安全に停止できる設計であること。

方針 20. 原子炉建屋の機能

1. 原子炉建家は、原則として、通常運転時に建屋内の負圧を維持し、かつ、漏えい率が所定の値を超えない設計であること。
2. 原子炉建屋は、放射性物質の放出を伴うような事故時等においては、原則として環境に放出される放射性物質の濃度と放出量を低減させる機能を有する設計であること。

方針 21. 実験設備等に関する設計上の考慮

1. 実験設備等は、その異常又は損傷によって原子炉の安全が損なわれない設計であること。
2. 実験設備等は、実験物の状態変化、移動等により運転中の原子炉に過度の反応度変化を与えない設計であること。
3. 実験設備等は、照射試料等を含めその内蔵する放射性物質の量に応じて適切な設計上の考慮がなされるとともに、その放射線及び放射性物質の著しい漏えいのおそれのない設計であること。
4. 実験設備等は、原子炉の安全上必須の事項について、制御室で監視できる設計であること。
5. 制御室と実験設備等の設置されている場所との間は、安全上の連絡ができる設計であること。

方針 22. 安全保護系の多重性

安全保護系は、その系統を構成する機器又はチャンネルに单一故障が起きた場合でも、その安全保護機能を喪失しないよう、多重性を有する設計であること。

方針 23. 安全保護系の独立性

安全保護系は、通常運転時及び異常状態において、その安全保機能が喪失しないように、その系統を構成するチャンネル相互を分離し、それぞれのチャンネル間の独立性を実用上可能な限り考慮した設計であること。

方針 24. 安全保護系の運転時の異常な過渡変化時の機能

安全保護系は、運転時の異常な過渡変化時に、その異常な状態を検知し、原子炉停止系の作動を自動的に開始させ、燃料の許容設計限度を超えないように考慮した設計であること。

方針 25. 安全保護系の事故時の機能

安全保護系は、事故時に、その異常な状態を検知し、原子炉停止系及び必要な工学的安全施設の作動を自動的に開始させる設計であること。

方針 26. 安全保護系の故障に対する設計上の考慮

安全保護系は、駆動源の喪失、系統の遮断及びその他の不利な状況が生じた場合においても、最終的に原子炉施設が安全な状態に落ち着く設計であること。

方針 27. 安全保護系と計測制御系との分類

安全保護系は、計測制御系と部分的に共用する場合には、計測制御系の影響により安全保護系の機能を失わないように、計測制御系から機能的に分離された設計であること。

方針 28. 制御室

1. 制御室は、通常運転時及び異常状態において、原子炉の安全上必須なすべての監視及び操作ができる設計であること。
2. 制御室は、原則として、事故時にも、必要な期間、放射線業務従事者が制御室にとどまり、事故対策操作が可能であるように、火災、放射線、空気汚染、有毒ガス等に対し適切な防護がなされた設計であること。
3. 原子炉建屋内に設けられた制御室は、事故時において放射線業務従事者の退避を考慮した設計であること。

方針 29. 制御室外からの原子炉停止機能

原子炉は、制御室外の適切な場所からも停止することができる設計であること。

方針 30. 通信連絡設備に関する設計上の考慮

原子炉施設は、適切な警報系及び通信連絡設備を備え、事故時に施設内に居るすべての人々に対し、制御室及び予め用意された場所から指示ができるとともに、原子炉施設と外部必要箇所との通信連絡設備は、多重性又は多様性を備えた設計であること。

方針 31. 避難通路に関する設計上の考慮

原子炉施設は、通常の照明用電源喪失時においても機能する避難用の照明を設備し、単純、明確かつ永続性のある標識を備えた安全避難通路を有する設計であること。

方針 32. 計測制御系

1. 計測制御系は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、原則として次の事項を十分に考慮した設計であること。
 - (1) 炉心及び原子炉建屋並びにそれらに関連する系統の健全性を確保するために必要なパラメータは、適切な予想範囲に維持制御されること。
 - (2) 前号のパラメータについては、必要な対策が講じ得るように予想変動範囲内の監視が可能のこと。
2. 計測制御系は、原則として、事故時において、事故の状態を知り、対策を講じるのに必要なパラメータを適切な方法で十分な範囲にわたり監視し得るとともに、必要なものについては、記録が可能な設計であること。

方針 33. 電気系統

1. 重要度の特に高い安全機能を有する構築物、系統及び機器が、その機能を確保するために電源を必要とする場合においては、商用電源及び非常用電源系のいずれからも電源の供給を受けられる設計であること。
2. 非常用電源系は、多重性及び多様性独立性を有し、動的機器の单一故障を仮定しても、所要の系統及び機器の安全機能が確実に行われるための十分な容量及び機能を有する設計であること。

方針 34. 核燃料の貯蔵設備及び取扱設備

燃料の貯蔵設備及び取扱設備は、次の各号に掲げる事項を考慮した設計であること。

- (1) 貯蔵設備は、適切な貯蔵能力を有すること。
- (2) 取扱い設備は、移送作業中の燃料の落下等を防止できること。

方針 35. 核燃料の臨界防止

核燃料の貯蔵設備及び取扱設備は、幾何学的な安全配置又はその他の適切な手段により臨界を防止できる設計であること。

方針 36. 核燃料取扱場所のモニタリング

核燃料の取扱場所は、異常な放射線レベルを検知し、適切な場所にこれらの警報を発する設計であること。

方針 37. 放射性気体廃棄物の処理施設

原子炉施設から発生する放射性気体廃棄物の処理施設は、適切な過、減衰、管理等を行うことにより、周辺環境に対して、放出放射性物質の濃度及び量を合理的に達成できる限り低減できる設計であること。

方針 38. 放射性液体廃棄物の処理施設

1. 原子炉施設から発生する放射性液体廃棄物の処理施設は、適切なろ過、凝集沈殿、蒸発処理、イオン交換、貯蔵、減衰、管理等を行うことにより、周辺環境に対して放出放射性物質の濃度及び量を合理的に達成できる限り低減できる設計であること。
2. 放射性液体廃棄物の処理施設及びこれに関連する施設は、これらの施設から液体状の放射性物質の漏えいの防止及び敷地外への管理されない放出の防止を考慮した設計であること。

方針 39. 放射性固体廃棄物の処理施設

原子炉施設から発生する放射性固体廃棄物の処理施設は、廃棄物の破碎、圧縮、焼却、固化等の処理過程における放射性物質の散逸等の防止を考慮した設計であること。

方針 40. 固体廃棄物貯蔵施設

固体廃棄物貯蔵施設は、原子炉から発生する放射性固体廃棄物を貯蔵する容量が十分であるとともに、廃棄物による汚染の拡大防止を考慮した設計であること。

方針 41. 敷地周辺の放射性防護

原子炉施設は、通常運転時において原子炉施設からの直接放射線及びスカイシャイン放射線による敷地周辺の空間線量率を合理的に達成できる限り低減できる設計であること。

方針 42. 放射線業務従事者の放射線防護

1. 原子炉施設は、放射線業務従事者の立入場所における線量当量を合理的に達成できる限り低減できるように、放射線業務従事者の作業性等を考慮して、遮へい、機器の配置、遠隔操作、放射性物質の漏えい防止、換気等、所要の放射線防護上の措置を合理的に達成な限り講じた設計であること。
2. 原子炉施設は異常状態において放射線業務従事者が必要な操作を行うことができるよう、放射線防護上の措置を講じた設計であること。

方針 43. 放射線業務従事者の放射線管理

原子炉施設は、放射線業務従事者を放射線から防備するために、放射線被ばくを適切に監視するとともに、放射線被ばくを管理するための放射線管理施設を設けた設計であること。また、放射線管理施設は、必要な情報を制御室又は適当な場所に表示できる設計であること。

方針 44. 放射線管理

原子炉施設は、通常運転時及び異常状態において、必要に応じて、原子炉建屋内雰囲気、原子炉施設の周辺監視区域周辺及び放射性物質の放出経路を適切にモニタリングできるとともに、必要な情報を制御室又は適当な場所に表示できる設計であること。

6.3 耐震設計方針

6.3.1 耐震設計の基本方針

核変換物理施設の耐震設計は、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針について」⁽⁹⁾の基本的考え方を参考にして、次の項目に従って行い、想定されるいかなる地震力に対してもこれが大きな事故の誘因とならないよう施設に十分な耐震性をもたせた設計とする。

- (1) 建物・構築物は原則として剛構造とする。
- (2) 施設の重要な建物・構築物は、原則として岩盤に支持させる。
- (3) 建物・構築物及び機器・配管系の耐震設計上の重要度分類を、地震により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点から、A、B及びCクラスに分類し、各々の重要度に応じた耐震設計を行う。
- (4) 前項のA、B及びCクラスの施設は、各々の重要度に応じた層せん断力係数に基づく地震力に対して耐えるように設計する。
- (5) Aクラスの施設は、基準地震動 S_1 に基づいた動的解析から求められる地震力に対して耐えるように設計する。

また、Bクラスの機器・配管系についても、共振するおそれのあるものについては、動的解析を行う。

- (6) Aクラスの施設については、水平地震力と同時に、かつ不利な方向に鉛直地震力が作用するものと考える。
- (7) 施設の構造計画及び配置計画に際しては、地震の影響が低減されるように考慮する。

6.3.2 耐震設計上の重要度分類

核変換物理施設の耐震設計上の施設別重要度を、地震により発生する可能性のある放射線による環境への影響の観点から、次のように分類する。

(1) 分類の原則

Aクラス …… 自ら放射性物質を内蔵しているか又は内蔵している施設に直接関係しており、その機能喪失により放射性物質を外部に放散する可能性のあるもの、及びこれらの事態を防止するために必要なもの並びにこれら事故発生の際に、外部に放散される放射性物質による影響を低減させるために必要なものであって、その影響、効果の大きいもの

Bクラス …… 上記において、影響、効果が比較的小さいもの

Cクラス …… Aクラス、Bクラス以外であって、一般産業施設と同等の安全性を保持すればよいもの

(2) 重要度によるクラス別施設

上記耐震設計上の重要度分類に従った各クラスに属する施設を次に示す。

Aクラス… a. 格子管集合体の形状を保つための設備

b. 核変換物理実験装置の緊急停止のために急激に負の反応度を添加するための設備及び核変換物理実験装置の停止状態を維持するための設備

c. 損壊等により、炉心に過度の反応度が添加されるおそれのある設備

d. 臨界管理上有意な量の燃料物質を内蔵している設備

e. 放射性廃棄物を貯蔵若しくは取り扱う設備であって、その機能喪失による影響の大きいもの

- B クラス… a. 放射性物質の放出を伴うような事故の際にその外部放散を抑制するための設備であってA クラス以外のもの
 b. 事故時、放射線の監視をするための設備
 c. 放射性物質を内蔵している設備であって、A クラス以外のもの、ただし、内蔵量が少ないか又は貯蔵方式によりその破損による一般公衆に与える放射線量の影響が十分小さいものは除く。

C クラス… 上記A、B クラスに属さない設備

なお、上位の分類に属するものは、下位の分類に属するものの破損によって波及的事故が生じないようにする。

6.4 陽子ビーム輸送機構

6.4.1 概要

陽子ビーム輸送機構（5.10節「その他原子炉の附属施設の構造及び設備」の「(口) 主要な実験設備の構造」に記載）は、未臨界実験における外部中性子源となる核破碎中性子を発生させるため、加速されたパルス状の陽子ビームを臨界集合体の中央付近に置くターゲットまで輸送する機構である。

6.4.2 設計方針

陽子ビーム輸送機構は次の設計方針に従い設計する。

- (1) 核変換物理実験施設に陽子ビームを供給する加速器施設における故障、火災等の異常事象によって施設の安全性が損なわれない設計とする。（基本方針(5)）
- (2) 本機構の異常又は損傷によって過度の中性子源強度とならない設計とする。（方針 21-1）
- (3) 本機構の運転中は炉心に反応度を添加しない設計とする。（方針 21-2）
- (4) 本機構は制御室で制御できる設計とする。（方針 21-4）

以下、第4章で示したF案及びG案について別個に主要設備及び安全設計に関する評価を記載する。

6.4.3 主要設備（ビームライン分離方式：F案）

Fig.6.1 に示すように、本機構は、陽子ビーム輸送管、導入窓、ビームシャッター、ビーム出力調整装置、ベンディング・マグネット、ビームダンプ、隔離弁、ビームモニター、ターゲット窓、真空系、電磁石、制御系等から構成される。

導入窓は核変換物理実験施設と加速器施設を分ける境界であり、陽子ビーム室の壁に設けられ、陽子ビームの入り口となる。

ビームシャッターは陽子ビーム室に設けられ、ビームの遮断を行う。

ビーム出力調整装置は導入された陽子ビームの出力をコリメータを使って調整する機構であり、陽子ビーム室に設けられる。

ベンディングマグネットは陽子ビームを核変換物理実験装置の方向に曲げるための電磁石であり、陽子ビーム室に設けられる。

ビームダンプはベンディングマグネットで曲げられずに直進する陽子を停止するための鉄の塊であり、陽子ビーム室に設けられる。

隔離弁は炉室2次容器（気密容器）壁に設けられ、ターゲット窓破損時に炉室の気密を保つ。

ビームモニターは炉室に設けられ、陽子ビームの電流の監視を行う。
ターゲット窓は集合体内で陽子ビームの出口となる。
陽子ビーム輸送管は導入窓からターゲット窓をつなぐ管であり、真空系はその内部を真
空に保つ。

電磁石は陽子ビーム輸送管に適当な間隔で配置され、陽子ビームの整形を行う。
制御系は、主に制御室に置かれ、陽子ビーム出力の調整、ベンディングマグネットの操
作、ビームシャッター及び隔離弁の操作、電磁石の操作、真空系の操作、ビームモニター
の監視を行う。

本機構の使用に関するインターロックを Table 6.1 に示す。ビーム入射の停止はベンデ
ィングマグネットを停止することにより陽子ビームをビームダンプへ投入すること、及び、
ビームシャッターの閉鎖により行う。

本機構の仕様は次の通りである。

(1) 個数	1式
(2) 陽子ビームの最大出力	10W (平均出力)
(3) 機構使用時の未臨界度	2% $\Delta k/k$ 以上

6.4.4 主要設備（レーザー発振器分離方式：G案）

Fig.6.2 に示すように、本機構は、陽子ビーム輸送管、導入窓、ビームシャッター、隔
離弁、ビームモニター、ターゲット窓、真空系、電磁石、レーザー発振器、制御系等から
構成される。

導入窓は核変換物理実験施設と加速器施設を分ける境界であり、陽子ビーム室の壁に設
けられ、陽子ビームの入り口となる。

ビームシャッターは陽子ビーム室に設けられ、ビームの遮断を行う。

隔離弁は炉室 2 次容器（気密容器）壁に設けられ、ターゲット窓破損時に炉室の気密を
保つ。

ビームモニターは炉室に設けられ、陽子ビームの電流の監視を行う。

ターゲット窓は集合体内で陽子ビームの出口となる。

陽子ビーム輸送管は導入窓からターゲット窓をつなぐ管であり、真空系はその内部を真
空に保つ。

電磁石は陽子ビーム輸送管に適当な間隔で配置され、陽子ビームの整形を行う。

レーザー発振器はレーザー機械室に置かれ、マイナスに帯電した陽子ビームを中性に荷
電変換することにより陽子ビームの出力を調整する。

制御系は、主に制御室に置かれ、レーザー出力の調整、ビームシャッター及び隔離弁の
操作、電磁石の操作、真空系の操作、ビームモニターの監視を行う。

本機構の使用に関するインターロックを Table 6.1 に示す。ビーム入射の停止はレーザ
ー発振器の停止及びビームシャッターの閉鎖により行う。

本機構の仕様は次の通りである。

(1) 個数	1式
(2) 陽子ビームの最大出力	10W (平均出力)
(3) 機構使用時の未臨界度	2% $\Delta k/k$ 以上

6.4.5 評価

(1) 加速器施設で故障、火災等の異常事象が発生しても、導入窓及びビームシャッター
により加速器施設と分離されるため、核変換物理実験施設の安全性は損なわれない。

- (2) 10W以上の陽子ビームは導入されない設計となっていること、及び、停電、地震、真空破断等は全て陽子ビーム強度を弱める方向に作用することから、過度の中性子源強度となることはない。
- (3) インターロックにより本機構の運転中は制御棒を挿入できないため、炉心に反応度が添加されることはない設計となっている。
- (4) 本機構は制御室で制御できる設計となっている。

7. 故障・事故の想定

ここでは、FCA設置許可申請書の添付書類八及び十における記述を参照して、核変換物理実験施設の設備・機器に故障や事故が発生した場合の影響について検討を行う。FCA建設時の解析結果をそのまま引用しているため、今後の詳細検討により結果の見直しが生じる可能性がある。

7.1 安全設計評価用想定

「研究炉安全評価審査指針」を参考に「運転時の異常な過渡変化」及び「事故」について考察する。これらの事象には安全機能を有する機器の故障、破損、誤操作等内部からの要因で生じるもの及び自然現象あるいは外部からの人的事象で生じるものと想定する。

7.1.1 運転時の異常な過渡変化

①制御棒誤挿入

制御棒は燃料で構成されており、挿入により正の反応度が印加される。運転員の誤操作等により臨界状態を超えて制御棒の挿入を続けることを想定する。反応度付加率は $0.01\% \Delta k/k/s$ 程度以下に制限されるため、スクラム（中性子束高、短ペリオド、安全系中性子束高等）信号による制御・安全棒引き抜き及び集合体分離により燃料破損に至る前に事象は終息する。また、スクラムに至る以前に制御棒挿入インターロック（短ペリオド）により制御棒の駆動は停止する。

②臨界後の集合体前進

集合体間隙効果の測定等において集合体が密着する前の状態で臨界とし、運転員の誤操作により集合体を更に前進させることを想定する。本事象はFCAの設置許可申請書添付書類において検討されており、ペリオド 20 秒のテーブル停止インターロックが機能しない場合でもスクラム（短ペリオド、安全系中性子束高等）信号による制御・安全棒引き抜き及び集合体分離により燃料破損に至る前に事象は終息する。

③未臨界時の陽子ビーム調整失敗（10W ビーム）

浅い未臨界度で低電流の陽子ビームを導入した実験を行っている時に誤って最大ビーム出力（10W）を入射することを想定する。

k_{eff} が 0.98 とすると、エネルギー増倍率は約 100 倍であり、瞬時に 1kW 出力に変化する。中性子束高等のスクラム信号による制御・安全棒引き抜き及び集合体分離により事象は終息する。制御・安全棒引き抜きに要する時間は 200ms 以内であることから、 $0.2\text{kW}\cdot\text{s} (7 \times 10^{12}\text{fission})$ 程度の出力量が予想されるが、燃焼度及び燃料温度上昇の観点から装置や燃料に影響はない。

④停電

停電が発生した場合には陽子ビームが停止すると共に、制御・安全棒は空気圧で引き抜かれ、集合体はバッテリー駆動で分離される。FP の蓄積がほとんどないため残留熱の除去は必要ない。 α 崩壊で発熱する燃料又はサンプルを用いる場合は非常用発電機を起動して送風により冷却する。炉室内の気密は停電時にも保たれるような設計と

するため、閉じ込め機能に問題は生じない。

7.1.2 事故

①臨界後の集合体前進における单一故障想定

「運転時の異常な過渡変化」②と同様に集合体間隙効果の測定等において集合体が密着する前の状態で臨界とし、運転員の誤操作により集合体を更に前進させることを想定する。前項の想定に加えて、短ペリオドによるスクラムの失敗を想定する。

この場合は FCA の設置許可申請書添付書類で解析されており、安全系中性子束高でスクラムに至るまでに $5\text{kW}\cdot\text{s}$ ($1.6 \times 10^{14}\text{fission}$) 程度のエネルギーが放出される結果となっている。この結果は核変換物理実験施設においても適用できると考えられる。この程度のエネルギーでは燃料温度上昇は 1°C 未満程度であり、装置及び燃料の損傷は生じず、周辺への放射線被ばくリスクを与えることはない。

7.2 立地評価用想定

「研究炉安全評価審査指針」を参考に「重大事故」及び「仮想事故」について考察する。

7.2.1 重大事故

①臨界後の集合体前進におけるペリオド・スクラム及び安全棒不作動

「事故」①でさらに安全棒の引き抜きに失敗することを想定する。この事象は FCA の重大事故として解析されており、集合体分離によって事象が終息するまでに過大に見積もって $4\text{MW}\cdot\text{s}$ ($1.4 \times 10^{17}\text{fission}$) の核分裂エネルギーが放出されるという結果が得られている。この場合、燃料板の平均温度上昇は 346°C 程度と見積もられており、ピーキングファクターを考慮しても燃料及び装置への影響及び周辺への放射線被ばくリスクを与えることはない。本事象については FCA の結果を核変換物理実験施設においても適用できると考えられる。

②未臨界時の過大陽子ビーム入射（1パルス）

第3章に示したように、ターゲット実験施設へ供給されていた大電流陽子ビームが本施設に入射される可能性はない。しかしながら、大強度陽子加速器と臨界実験装置を連結する本施設の特異性に鑑みて、陽子ビーム導入が及ぼす事故の影響度を評価しておくことは有意義であると考えられる。ここでは、陽子ビームを導入した未臨界実験の実施中に 200kW ビーム (25Hz) 1パルス (8kJ) が入射した場合を考える。

k_{eff} が 0.98 (陽子ビーム導入時の上限) とすると、エネルギー増倍率は約 100 倍であり、 $0.8\text{MW}\cdot\text{s}$ の核分裂エネルギー ($3 \times 10^{16}\text{fission}$ に相当) が放出されることになる。核分裂総数から見て前記①の $1/5$ 程度の影響が考えられる。従って、燃料及び装置への影響及び周辺への放射線被ばくリスクを与えることはない。

7.2.2 仮想事故

燃料溶融による再臨界事故を考える。FCA の設置許可申請書添付書類においては重大事故①と同様の事象においてスクラムに失敗して燃料が溶融し、炉心内のボイドに落ち込みこれを埋めることにより大きな正の反応度が加えられる場合の解析を行っている。

発生するエネルギーは $10^4 \text{MW}\cdot\text{s}$ 程度 ($3 \times 10^{20} \text{fission}$ 相当) であり、爆発エネルギーとしては 30kgTNT 相当と考えられる。また、二次容器内圧力は 1.3 気圧程度に上昇する。FCA の一次容器は 100kgTNT 火薬相当の衝撃に耐えられるように設計され、かつ、二次容器は 1.6 気圧の静圧で 2%/日の漏えい率となるように設計されているため、閉じ込め機能に影響はない。また、予想される金属火災（金属燃料及びアルミニウム）にはアルゴン消火設備を用いて対処する。さらに、FCA では核分裂生成物及び核燃料が二次容器から漏れるとして、風下 900m の敷地境界における被ばく線量を評価している。その結果、放射性雲からの全身被ばくで 5mSv 、プルトニウムの内部被ばくで 60mSv 、ストロンチウムの内部被ばくで 6mSv 程度となっている。

核変換物理実験施設においても同様の再臨界事故を想定した場合は、FCA と同様の耐爆・気密構造が必要となる。今後、仮想事故想定において過度に安全側の評価となっている部分を見直すと共に、FCA 建設当時からの解析精度の向上及び建家建設技術の進展を考慮して合理的な施設設計を進める必要がある。

8. まとめ

原研 - KEK 大強度陽子加速器計画の一環として、加速器駆動未臨界システム(ADS)を用いた核変換技術の開発のうち、ADS の炉物理上の課題克服を目的とする「核変換物理実験施設」の概念検討の概要をまとめた。

実験の目的は、「核破碎中性子源で駆動される高速未臨界体系の核特性評価」、「加速器駆動ハイブリッドシステムの運転・制御性検証」及び「MA 及び LLFP の核変換特性評価」の 3 点である。

核変換物理実験施設は、最高熱出力 500W 、最高陽子ビーム出力 10W の臨界実験施設とした。原研既存の高速炉臨界実験装置 FCA を参考に、FCA からの変更箇所、陽子ビームの導入方法、施設の構成、安全設計方針、故障・事故時の挙動を検討した。

これらの検討から、核変換物理実験施設と加速器施設とを許認可上で切り離し、それぞれの装置製作及び施設建設を独立に進めることができるとの見込みを得た。今後、さらに検討を重ねて、安全性・先進性・利便性・汎用性を兼ね備えた実験施設として、核変換物理実験施設の設計を実施していく。

謝 辞

施設の許認可を他の加速器施設と切り離して進めるのに必要な要件を検討するために、原研における原子力安全の専門家で構成した「大強度陽子加速器計画安全性検討部会」が平成12年2月に組織され、約3ヶ月にわたって検討を行っていただきました。本報告書の作成に当たっては、当部会による議論の結果を参考といたしました。当部会の部会長を務めていただいた早田邦久 東海研副所長をはじめとする委員の方々*には部会での議論を通して多くの有益な助言を戴きました。ここに心より感謝の意を表します。

また、本検討を進めるに当たって多くの有益な助言と激励を戴いた田中俊一 東海研副所長及び向山武彦 特別研究員をはじめとする中性子科学研究センターの諸氏に感謝いたします。さらに、中川正幸部長、岡嶋成見主任研究員をはじめとするエネルギー・システム研究部の諸氏からは、実験項目及び装置仕様に対する有益な意見を戴きました。ここに感謝の意を表します。

* 部会長	：早田 邦久（東海研 副所長）
部会長代理	：落合 政昭（エネルギー・システム研究部 次長）
委員	：平野 雅司（安全性試験センター 主任研究員） 本間 俊充（原子炉安全工学部 副主任研究員） 木内 重彰（安全管理室 調査役） 村山 洋二（研究炉部 調査役） 柳澤 宏司（安全試験部 課長代理）
	（順不同、敬称略）

参考文献

- (1) 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構 共同推進チーム：「大強度陽子加速器計画」，JAERI-Tech 2000-003 (2000).
- (2) Mukaiyama T., et al. : "Partitioning and Transmutation Program 'OMEGA' at JAERI", Proc. Int. Conf. on Evaluation of Emerging Nuclear Fuel Cycle Systems (Global 1995), Sep. 11-14, 1995, Versailles, France, Vol. 1, p. 110 (1995).
- (3) 佐々敏信、他：「核変換実験施設の概念検討 (2)核変換工学実験施設の概要」，公刊予定 (2000).
- (4) Soule R., et al. : "Validation of Neutronic Methods Applied to the Analysis of Fast Subcritical Systems : The MUSE-2 Experiments", Proc. Int. Conf. on Future Nuclear Systems (Global '97), Oct 5-10, 1997, Yokohama, Japan, Vol. 1, p. 639 (1997).
- (5) Calero J., et al. : "Experimental Temperature Measurements for Energy Amplifier Test", Nucl. Instr. Meth. A376, 89 (1996).
- (6) 平岡 徹：私信 (1995).
- (7) 原子力安全委員会：「水冷却型試験研究用原子炉施設の安全評価に関する審査指針」，平成3年7月18日.
- (8) 原子力安全委員会：「水冷却型試験研究用原子炉施設に関する安全設計審査指針について」，平成3年7月18日.
- (9) 原子力安全委員会：「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針について」，昭和56年7月20日.

Table 2.1 集合体仕様の比較⁽⁶⁾

	垂直一体型	水平2分割型
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・炉心の再現性が高い ・自動燃料装填装置を作り易い ・炉心中央断面に異物がない ・計測機器を挿入しやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ・停止時に未臨界性が高い ・炉心中央断面に直接触れられる ・スクラム時にインポータンスの高い炉中心部から制御棒が抜ける
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料を縦詰めにすると自動化が難しい ・燃料を横詰めにすると厚みの誤差が集積する ・半径方向の実験孔が作りにくい ・制御棒引抜き時間が長い ・格子管締付け方式が問題 	<ul style="list-style-type: none"> ・中心面に異物（引出しのSUSの端面）が入る ・1/2集合体の端面間のギャップの平行性に問題がある ・スクラム時に引出しが飛出し不揃いになる ・地震時のスクラムにより、揺れの中で架台が動く

Table 2.2 核変換物理実験施設における研究・開発課題

研究・開発の目的	研究・開発課題
核破碎中性子源で駆動される高速未臨界体系の核特性評価	未臨界体系における出力分布
	未臨界度の決定
	中性子源の実効強度
	高エネルギー中性子の影響
	ターゲット、ビーム窓、ボイドの存在
	鉛-ビスマス冷却材の模擬
加速器駆動ハイブリッドシステムの運転・制御性検証	ビーム出力の調整によるフィードバック制御
	ビームトリップ時及び立ち上げ時の挙動
	温度係数の測定（炉心、ターゲット）
	出力振動、炉心のデカップリング
	エネルギー増倍率の決定
MA 及び LLFP の核変換特性評価	MA の核変換率測定
	MA、LLFP のサンプル反応度価値測定
	LLFP 用減速領域付き体系の核特性
	MA 窒化物燃料の模擬

Table 4.1 施設切り離しの考え方案 (1/4)

方式案	A案 原子炉施設追加方式	B案 核燃使用施設分離方式
概念図	<p>D案</p> <p>核変換工学実験施設</p> <p>ビームダム</p> <p>ビームダム</p> <p>工業実験装置</p> <p>レーザ 発振器</p> <p>核変換物理実験施設</p> <p>炉室</p> <p>制御室</p> <p>後付機器 (原子炉施設)</p> <p>核燃使用施設 の一部</p>	<p>D案</p> <p>核変換工学実験施設</p> <p>ビームダム</p> <p>ビームダム</p> <p>工業実験装置</p> <p>レーザ 発振器</p> <p>核変換物理実験施設</p> <p>炉室</p> <p>制御室</p> <p>核燃使用施設 の一部</p>
考え方の要点	加速器施設として建設したビームライン及びトンネルに原子炉施設であるレーザー荷電変換器等を設置する。	ビームライン、トンネル、レーザー荷電変換器などは未臨界実験のみに使用する部分があるので、これらの機器・設備を核燃使用施設として申請し、核変換物理実験施設の設置許可以前に造る。
評価・問題点	加速器施設であるビームライン及びトンネルに原子炉施設に属する機器が設置されるため、混乱を生じるおそれがある。トンネルの耐震性が問題となり、コスト面でもF案及びG案に劣る可能性がある。	核燃使用施設としての要件で未臨界度の制限値を定める必要があるが、臨界実験装置であるためハード的に未臨界を担保することは困難であると考えられる。 実験上の制約が増えると考えられる。

Table 4.1 施設切り離しの考え方方案 (2/4)

方式案	C案 核変換実験施設一括分離方式	D案 原子炉施設建て替え方式
概念図	<p>レーザ 実験器</p> <p>核変換工学実験施設</p> <p>ビームダップ</p> <p>工学実験装置</p> <p>原子炉施設の一部</p> <p>核変換物理実験施設</p> <p>制御室</p> <p>炉室</p>	<p>核変換工学実験施設</p> <p>ビームダップ</p> <p>工学実験装置</p> <p>原子炉施設に建て替え</p> <p>核変換物理実験施設</p> <p>制御室</p> <p>炉室</p>
考え方の要点	<p>ビームライン、トンネル、レーザー荷電変換器などを原子炉施設として建設する。核変換工学実験施設の建設を核変換物理実験施設の設置許可取得後に開始する。</p>	<p>核変換工学実験施設の一部として建設したビームライン、トンネル、電磁石等で核変換物理実験施設でも必要となる部分を原子炉施設として同じ場所に建設し直す。</p>
評価・問題点	<p>最も単純な考え方であるが、核変換物理実験施設の設置許可取得が遅れると、核変換工学実験施設における材料照射試験のスケジュールに支障を来す。</p> <p>原子炉施設の範囲が増えるため、コスト上昇も懸念される。</p> <p>他の案が現実的でない場合の最終候補とする。</p>	<p>核変換物理実験施設のビームラインを建設する際には実験を休止する必要がある。</p> <p>建て替えに要する費用が多大であると考えられるため、現実的ではない。</p>

Table 4.1 施設切り離しの考え方案 (3/4)

方式案	E案 ビームライン付け替え方式	F案 ビームライン分離方式
概念図	<p>核変換工学実験施設 原子炉施設建設時 に増設し、ビーム ラインを付け替え</p>	<p>核変換工学実験施設 核変換物理実験施設</p>
考え方の要点	核変換工学実験施設の一部として建設したビームライン、トンネル、電磁石等で核変換物理実験施設でも必要となる部分を原子炉施設として別の場所に建設し、最後にラインをつなぐ。	レーザー荷電変換や直列電磁石等は用いるが、原子炉施設として必要なファイードバック制御機構（可変コリメータなど）は別途原子炉建室内に置く。
評価・問題点	核変換物理実験施設のビームラインを建設する際には実験を休止する必要があるが、D案ほど長期にははわたらない。 ビームライン及びトンネルを2系統建設することになり、かつ、機器の最適な配置に支障を来すため、現実的ではない。	加速器施設と原子炉施設の境界が明確になる。 レーザー荷電変換によるファイードバック制御は行わない。

Table 4.1 施設切り離しの考え方方案 (4/4)

方式案	G案 G案 レーザー発振器分離方式
概念図	<p>The diagram illustrates the G case concept. It shows a reactor building containing a reactor core and a control room. A beam line originates from the reactor building, passes through a beam dump, and enters a beam exchange facility. From there, it splits into two paths: one leading to a laser oscillator room and another leading to a beam exchange facility. The beam exchange facility is connected to an industrial experiment facility.</p> <p>Legend: ■: 原子炉施設としてビームラインから分離</p>
考え方の要点	<p>加速器施設として建設したビームライン及びトンネルにレーザー一荷電変換器等を設置する。但し、原子炉施設へ導入される陽子ビームを制御するレーザー発振器部分は原子炉施設内にする。</p>
評価・問題点	<p>A案で問題となつた境界の曖昧さは解消される。 F案で必要であつたコリメータを使つた陽子ビーム制御は不要となる。 レーザービームの輸送に関する詳細な検討が必要である。</p>

Table 6.1 陽子ビーム導入インターロック回路

項目	作動条件	
(a) ビームシャッタ ー開放	(i)	両 1/2 集合体が密着していること。
	(ii)	安全棒が完全に挿入されていること。
	(iii)	制御棒が完全に挿入されていること。
	(iv)	スクラムがいつでも動作しうる状態になっているこ と。
(b) ビーム入射	ビームシャッター及び隔離弁が開放になっていること。	
(c) 制御棒挿入禁止	ビームシャッター開放中は制御棒の挿入ができない。	
(d) ビーム停止イン ターロック	次のような場合にビ ーム入射を停止する。	(i) ビーム電流が規定値を超えた場 合。 (ii) 施設内ビームライン真空度が 規定値以下になった場合。

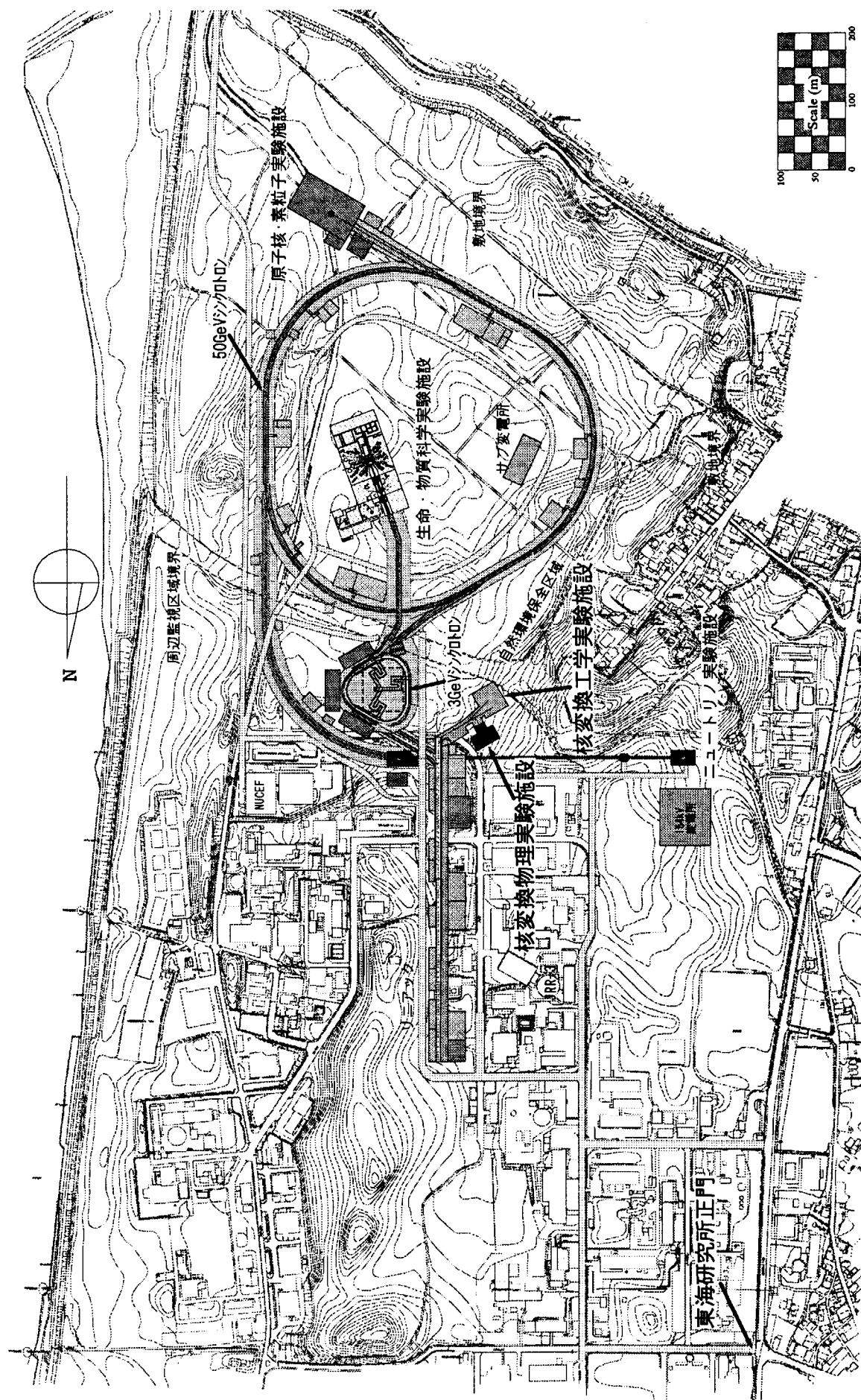


Fig.1.1 大強度陽子加速器計画の施設配置案

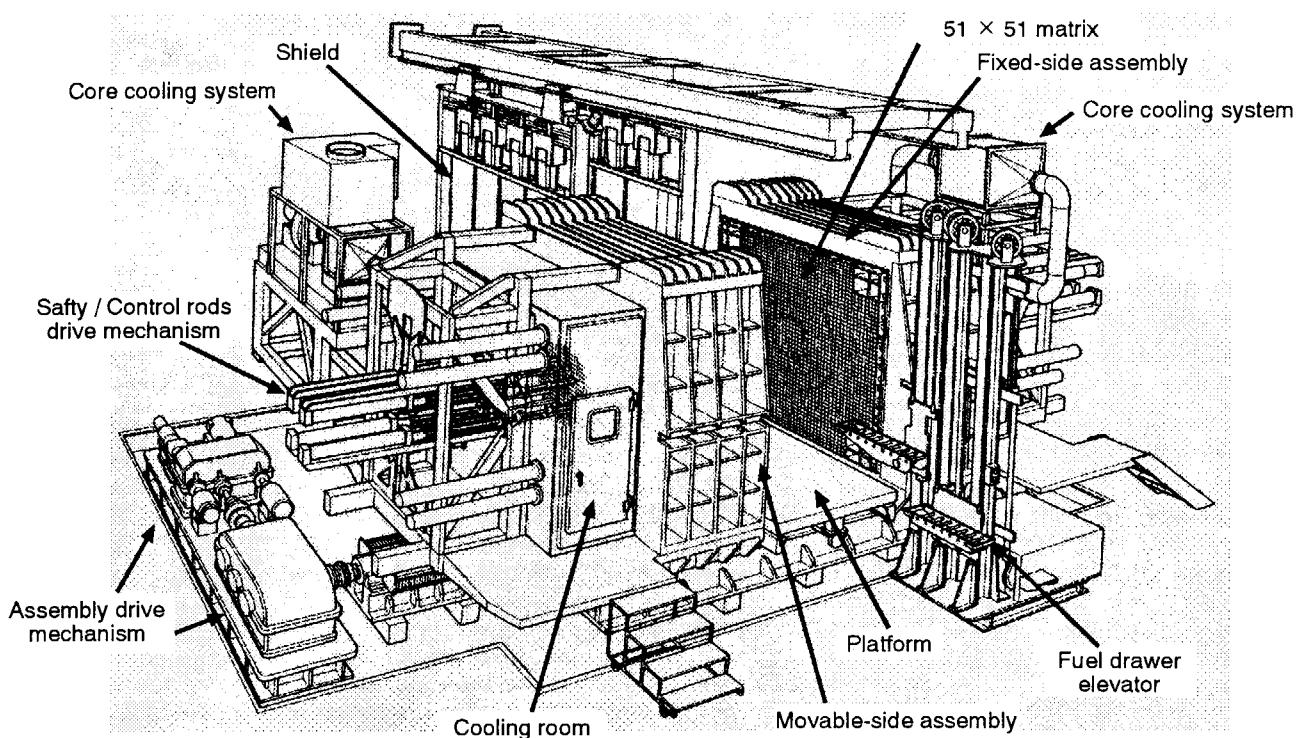


Fig.2.1 F C A概念図

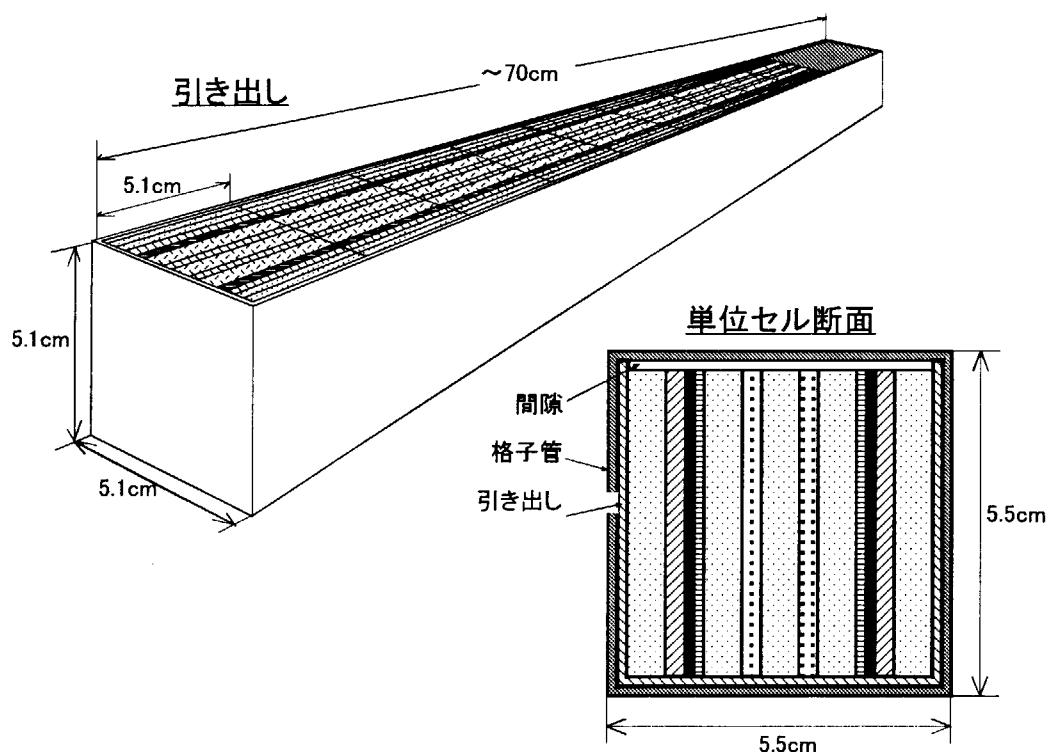


Fig.2.2 燃料引き出し概念図

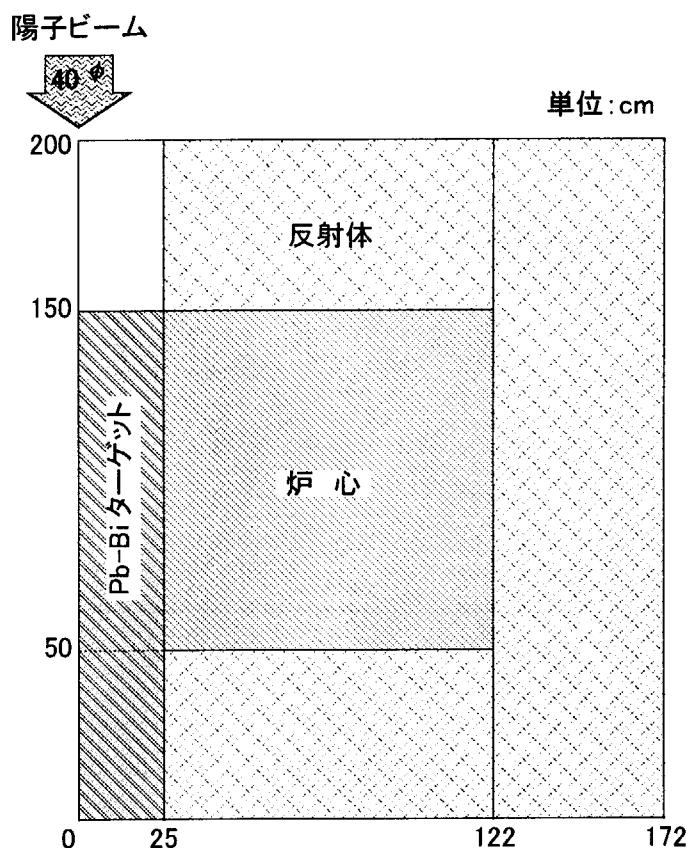


Fig.2.3 800MWe ADS プラントの RZ モデル

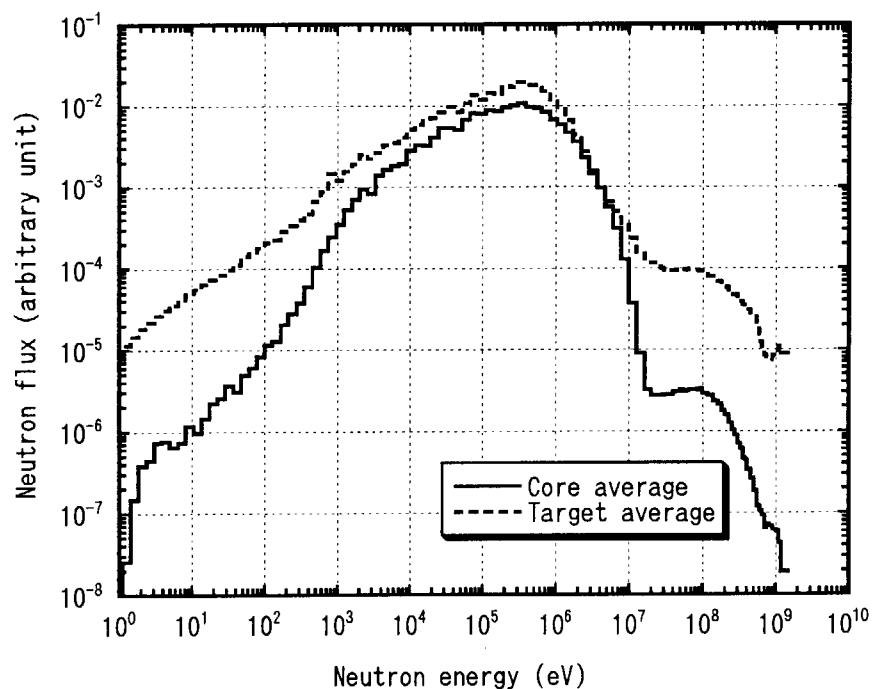


Fig.2.4 中性子束のエネルギー分布

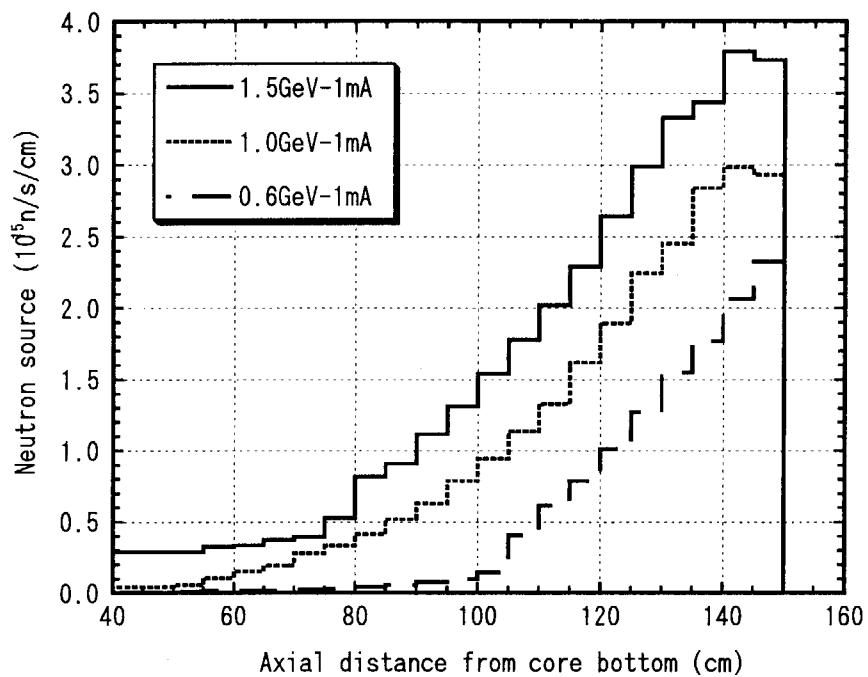


Fig. 2.5 中性子源の軸方向分布

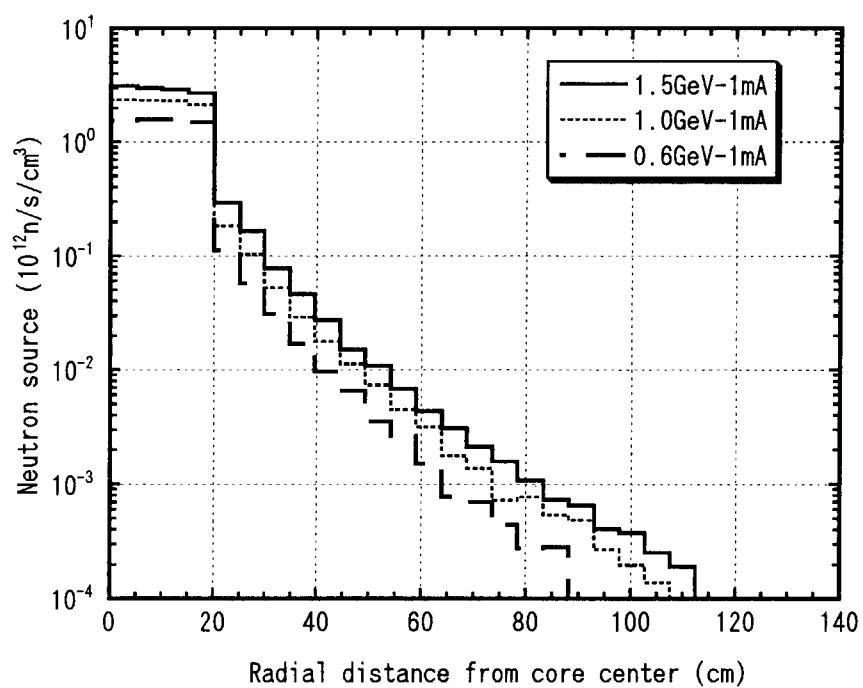


Fig. 2.6 中性子源の径方向分布

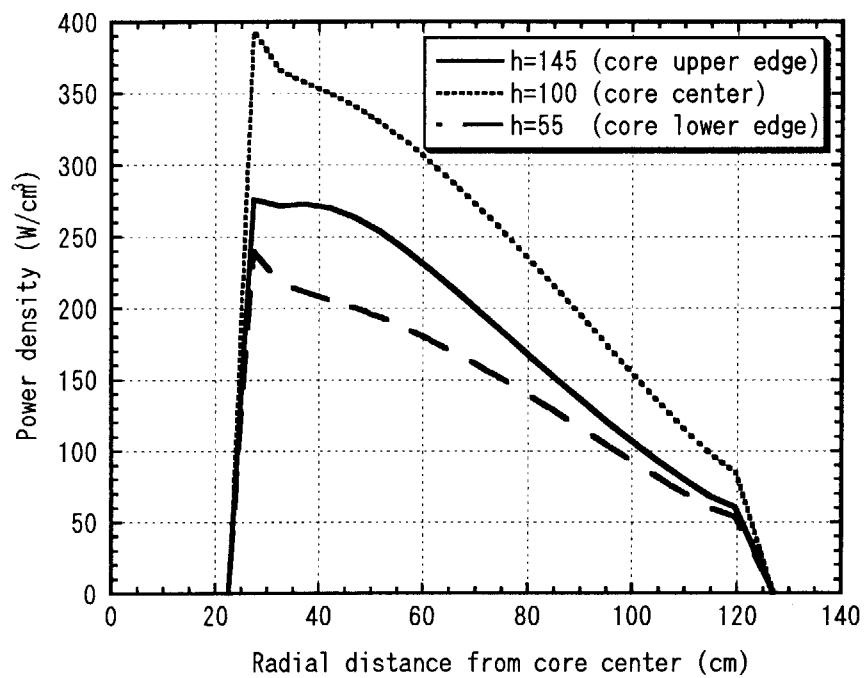


Fig.2.7 径方向出力分布

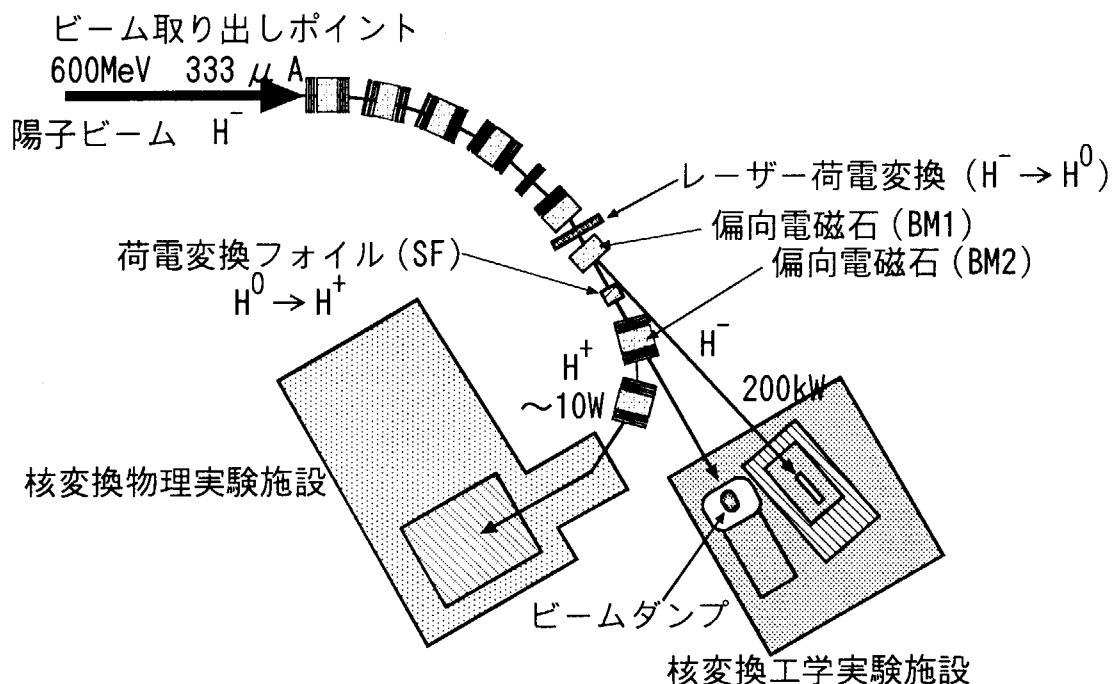


Fig.3.1 陽子ビーム導入機構の構成

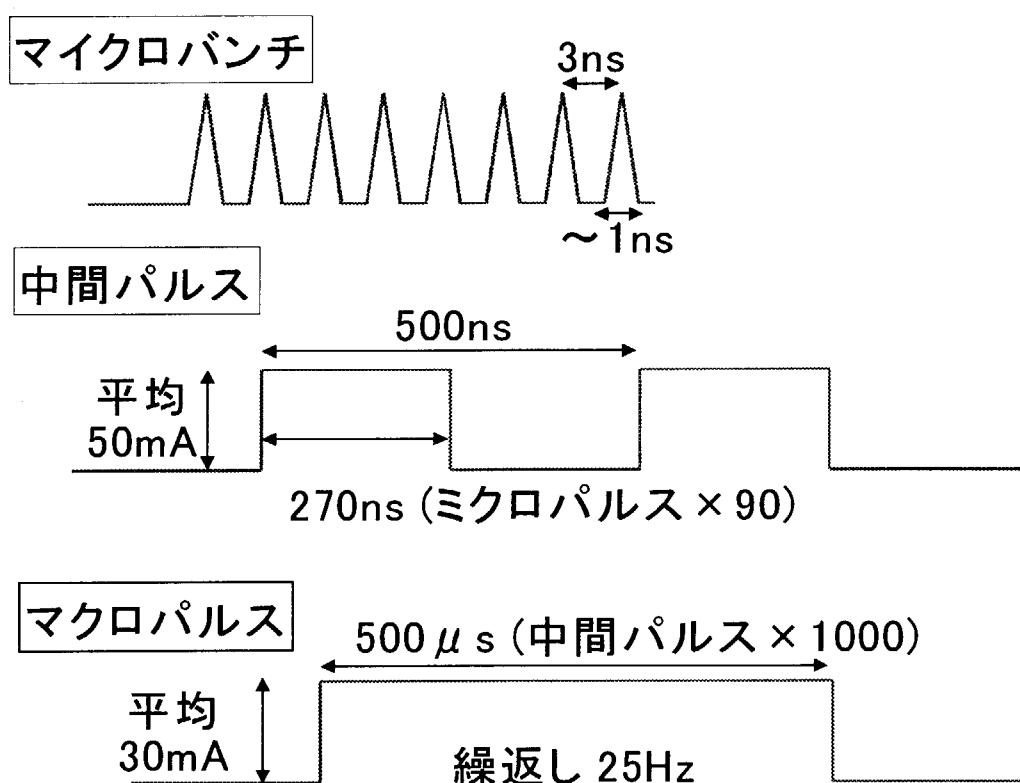


Fig.3.2 陽子ビームの時間構造

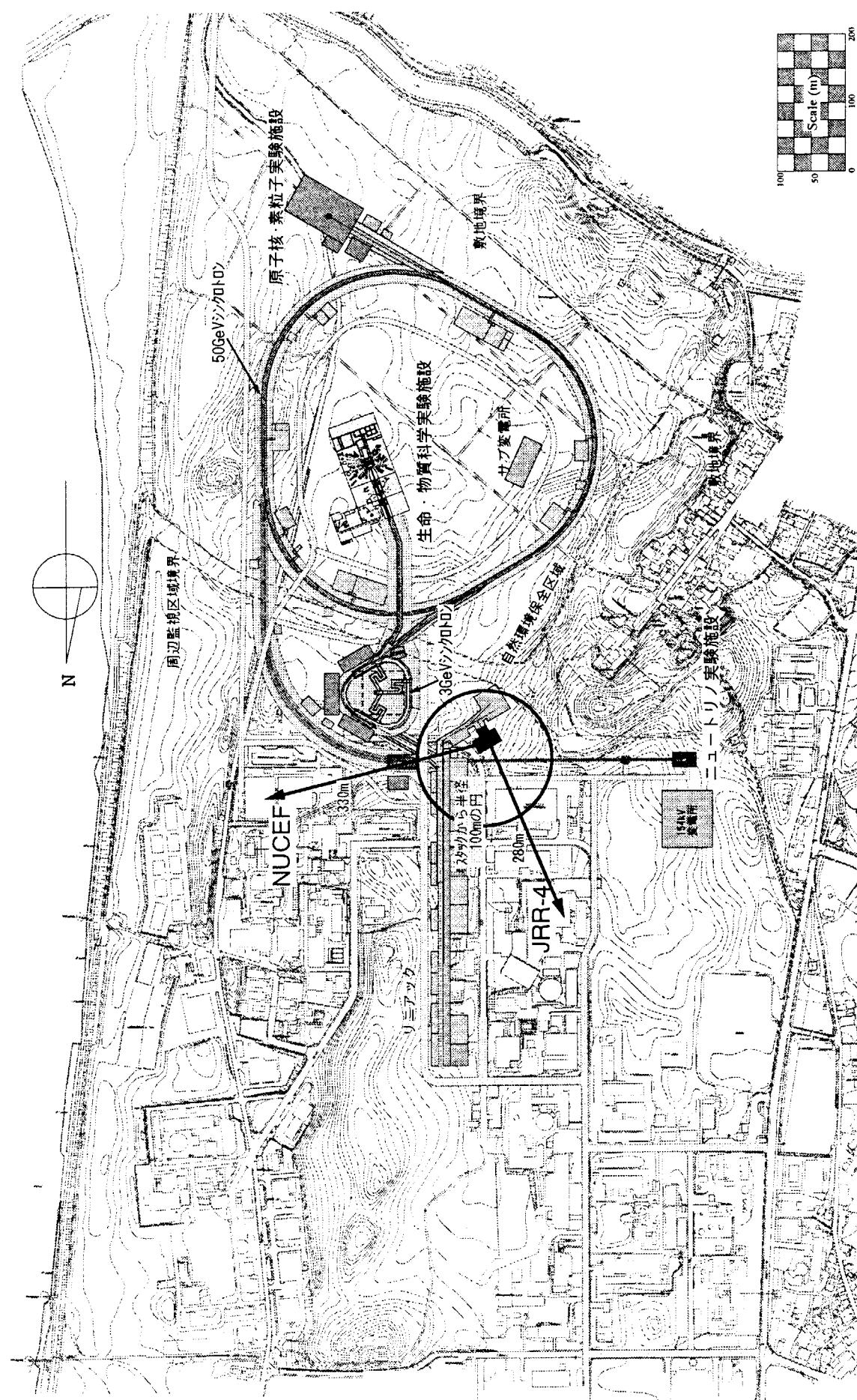


Fig.5.1 核変換物理実験施設の位置(案)

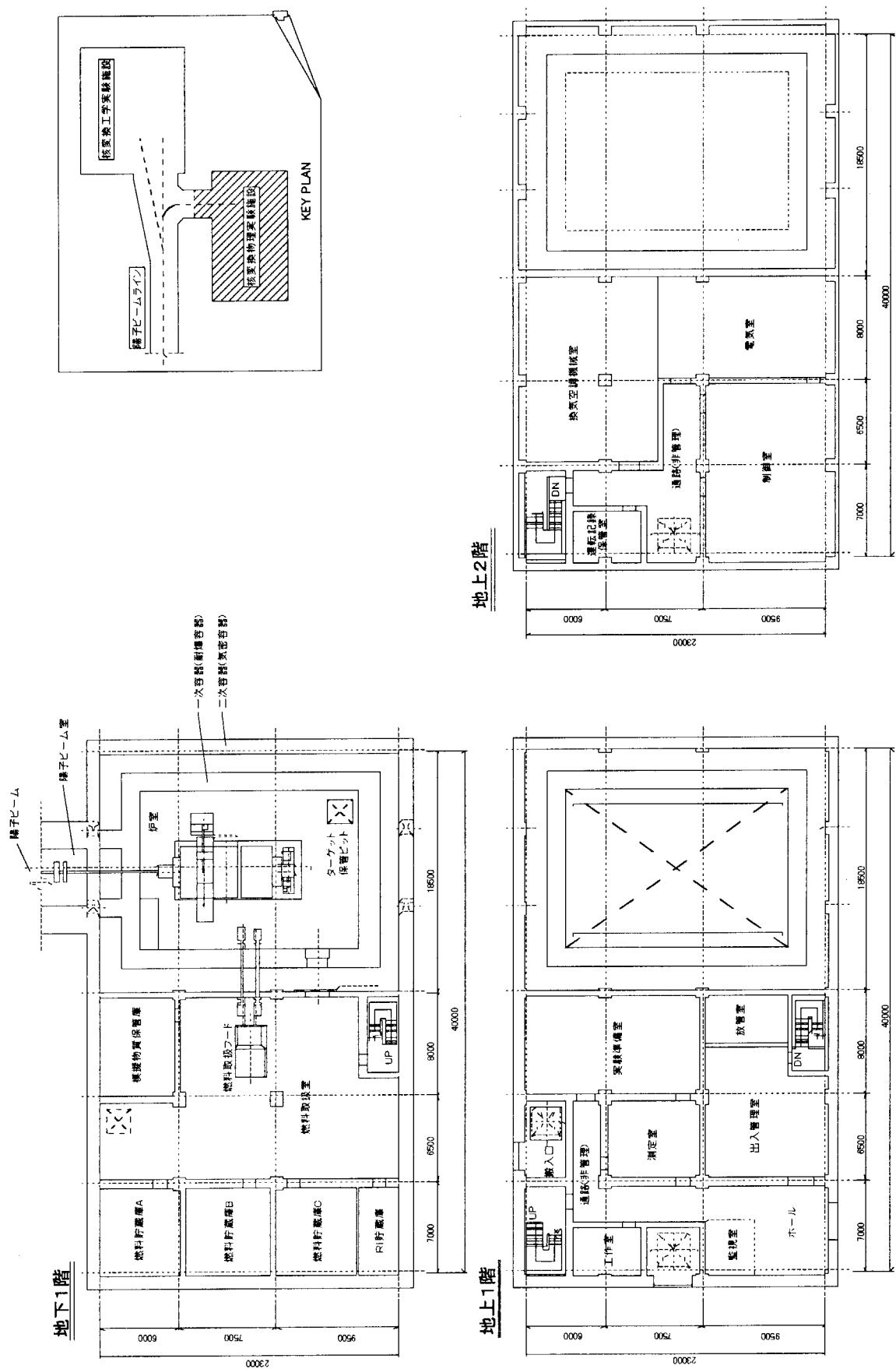


Fig.5.2 実験棟概略図（平面図）

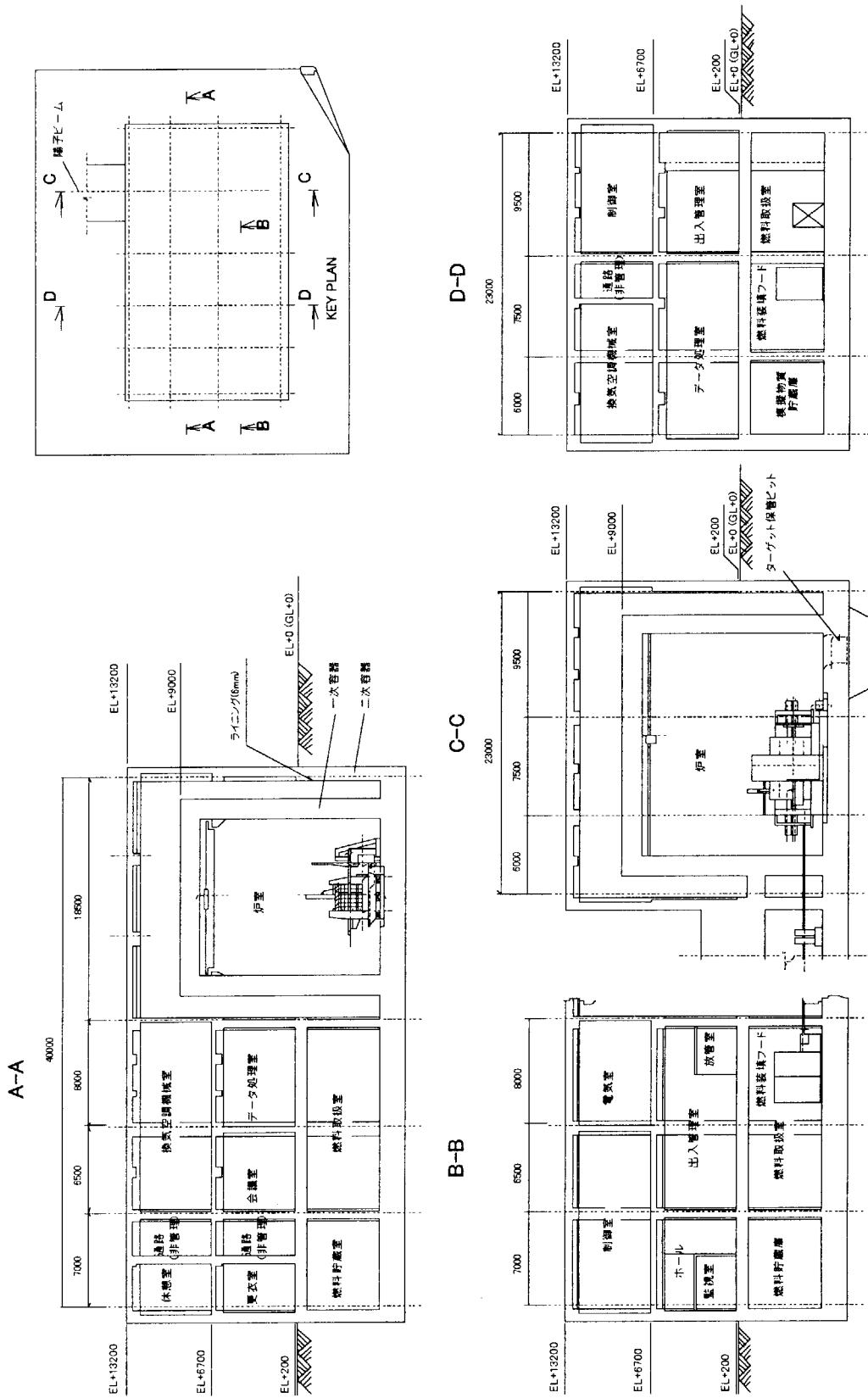


Fig. 5.3 実験棟概略図（立面図）

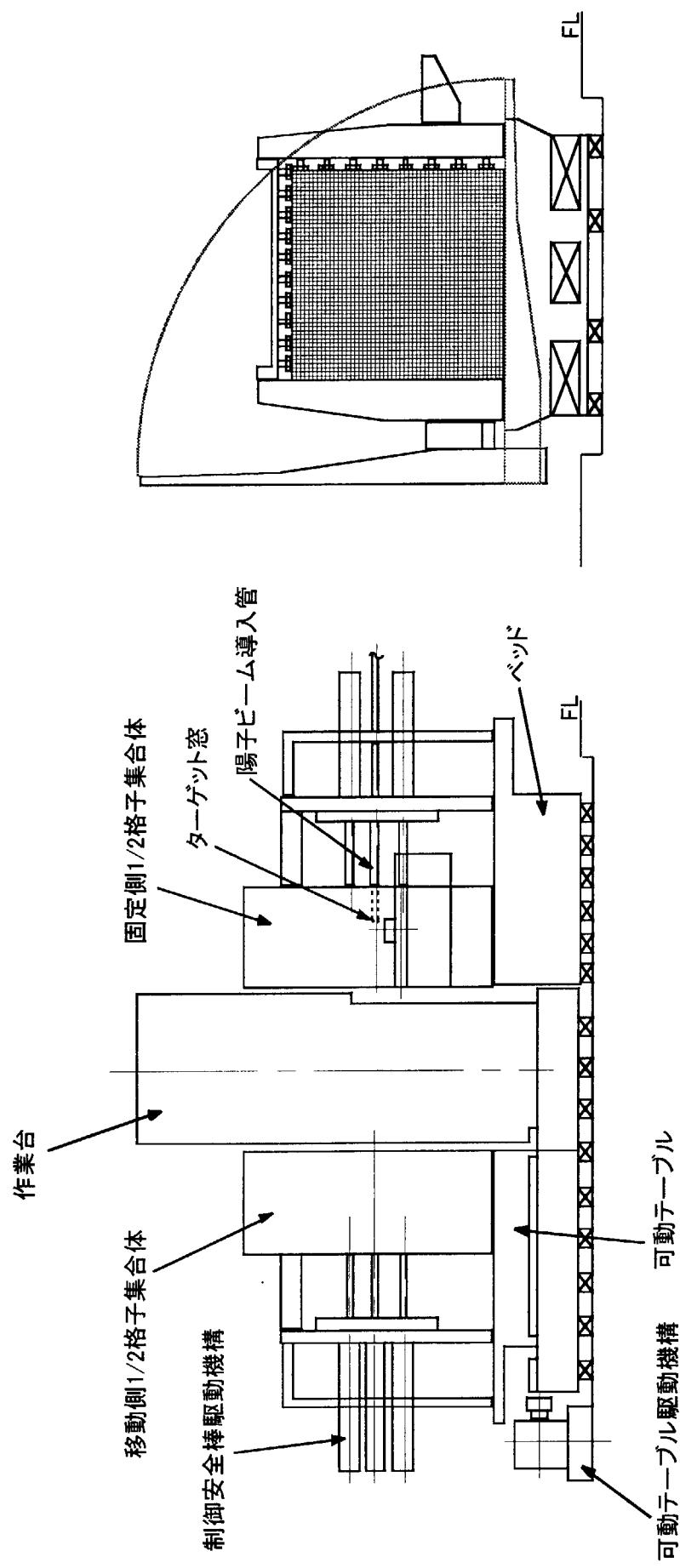


Fig. 5.4 格子管集合体概略図

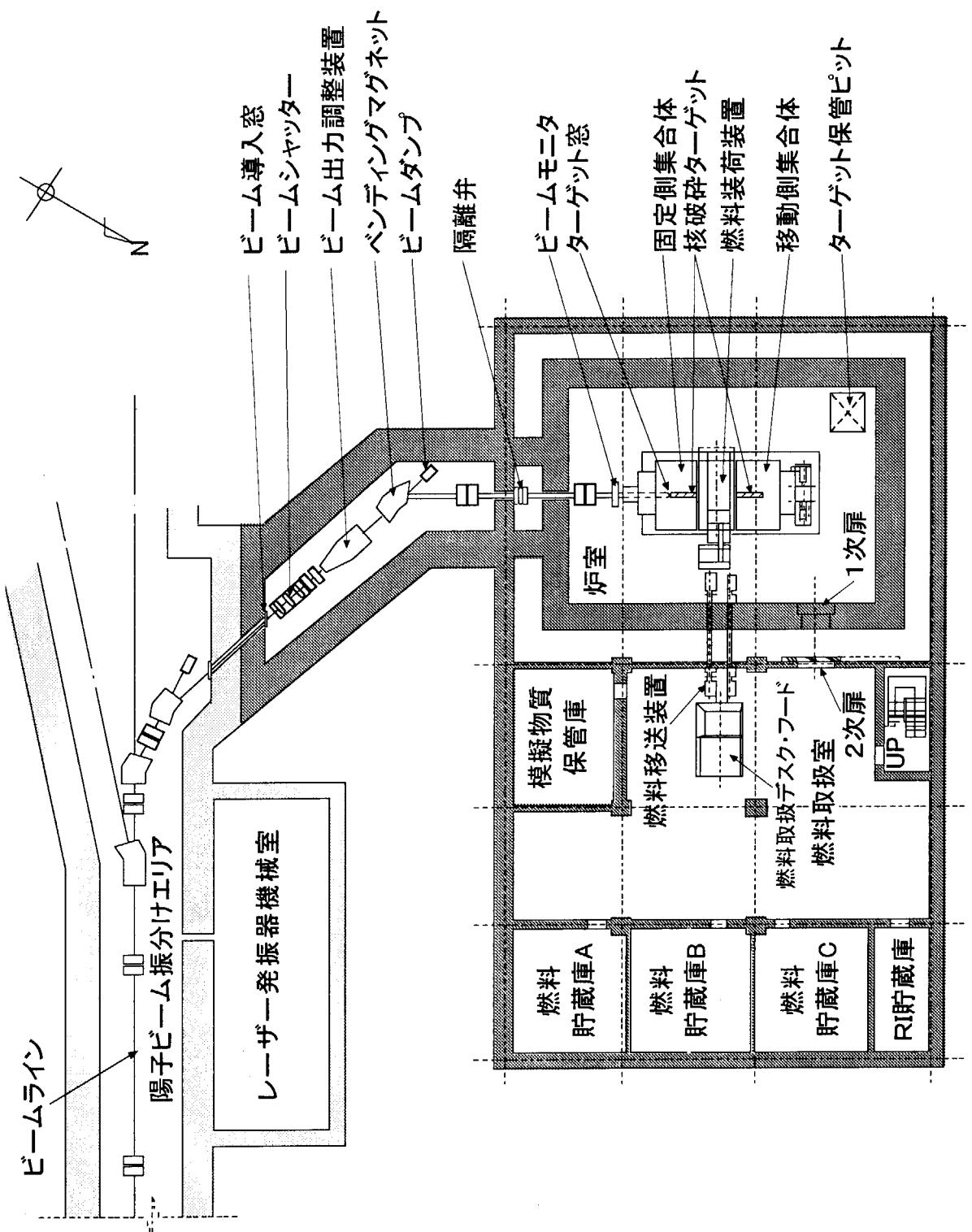


Fig.6.1 核変換物理実験施設 配置案 (F案)

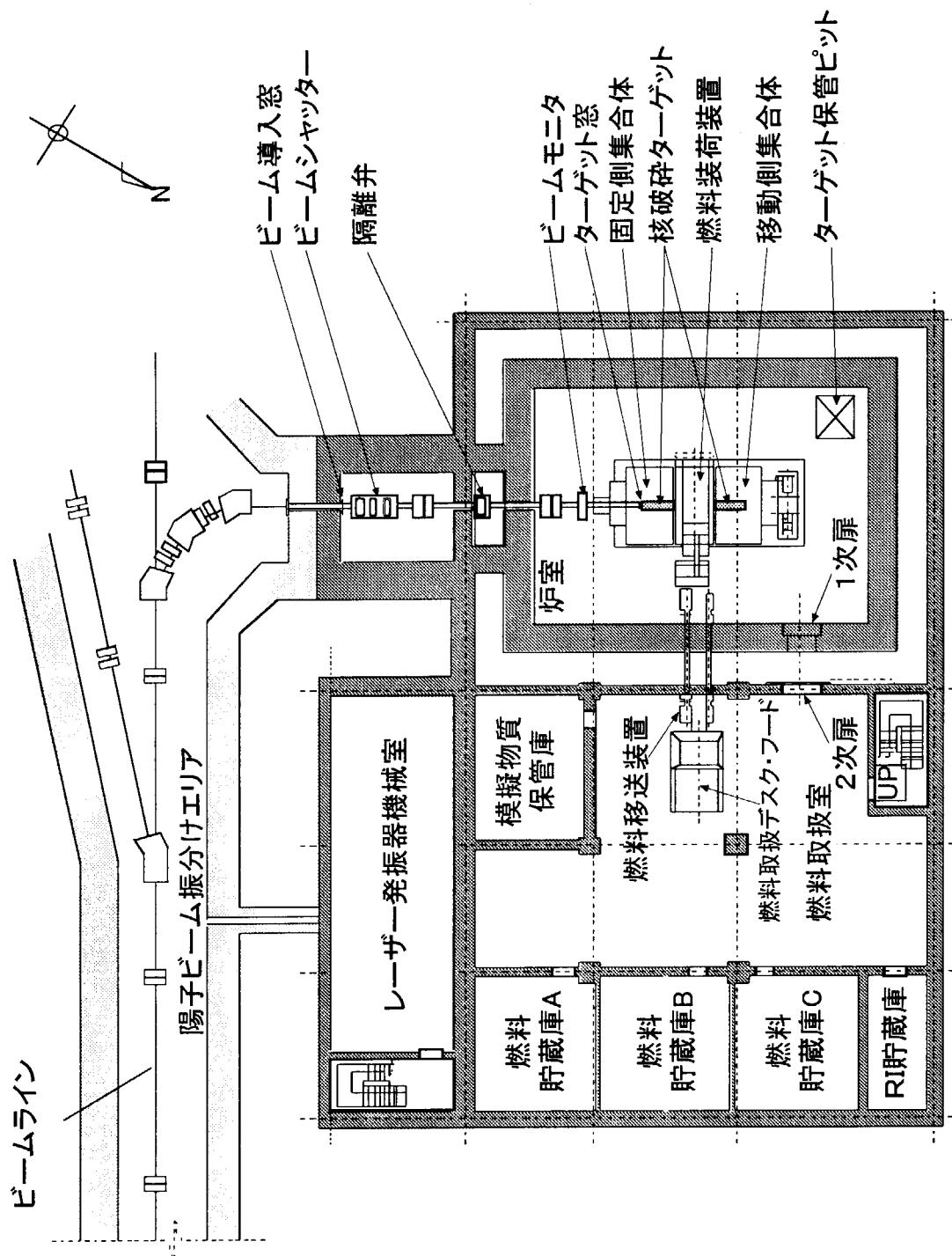


Fig. 6.2 核変換物理実験施設 配置案 (G案)

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
光强度	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	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
線量等量	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	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、ヘクト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わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- ECC顧僚理事会指令では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。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

換 算 表

压	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	1bf/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

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

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

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 = 4.18605J (計量法)	
								= 4.184J (熱化学)	
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}		
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	= 4.1855J (15°C)	
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	342.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	= 4.1868J (国際蒸氣表)	
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仮馬力)	
	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}	= 735.499W	
	1.60218×10^{19}	1.63377×10^{20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-26}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1		

放射能	Bq	Ci	吸收線量	Gy	rad
	1	2.70270×10^{-6}		1	100
	3.7×10^{10}	1	0.01	1	

照 射 線 量	C/kg		R
	1	2.58×10^{-4}	
	1		1

線量当量	Sv	rem	100
	1	1	
	0.01	1	

(86年12月26日現在)

