

加速器・核分裂ハイブリッド炉検討

1995年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。については複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

加速器・核分裂ハイブリッド炉検討

大坪 章*、佐久間 実*

原田 秀郎**

要 旨

昨年度の調査検討の結果、加速器・核分裂炉ハイブリッド炉のうち最も実現性が高い、固体ターゲットと固体燃料を組み合わせた概念について検討した。即ち本年度は「常陽」を例にとって、未臨界の液体金属冷却高速炉（LMFR）と加速器とを組み合わせたハイブリッド炉概念について検討を行った。この検討では特に、炉心、加速器系、及び炉の改造部分に焦点をあてた。

炉の改造は次の考え方に従った。TRU消滅処理プラントとしての特性把握を主眼として、炉心体系をパトリックに変更し、実験データの取得と消滅処理の実績をあげることを目的とする。従って、炉の原型をできるだけ保つこととし、炉心上部機構までの取り替えを行う。

炉心部については、ターゲット部はタングステン製のターゲット集合体本数19体、燃料部はその外側の環状領域をステンレス被覆のTRU金属燃料またはTRU酸化物の炉心燃料集合体とした。炉心高さは1mである。出力平坦化のため制御棒を4体設置した。

加速器系としては、500MeV-10mAの陽子線形加速器を選定した。陽子加速器の配置については、他の建屋との干渉が少ない南西の方向に設置することとした。

更に原子炉構造側の改造手順について検討を行うとともに、許認可項目及びR&D項目の抽出を行った。

* 大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

** 東海事業所核燃料技術開発部先端技術開発室

A p r . 1 9 9 5

Study on an Accelerator Driven Fission Reactor

Akira Otsubo * , Minoru Sakuma *
Hideo Harada **.

ABSTRACT

Study was performed on hybrid systems of a subcritical fission reactor driven by an accelerator last year. A system using solid core fuel and a solid target was concluded to have the highest technical feasibility among them. The system of the highest feasibility was studied this year. The system studied this year uses a subcritical LMFR based on a reactor like "JOYO" and the accelerator. The study was specially focused on a core, the accelerator and reconstructed parts of the reactor. The chief end of the reconstruction is for building a plant to grasp plant characteristics of burning TRU. The objective of a reconstructed plant is acquirement of experimental data and actual results on burning TRU by changing its core geometrical parameters. Therefore the policy of the reconstruction is conserving the present state of the reactor as far as possible. Component exchange is performed only on its upper core structure.

Concerning the core, its target part consists of 19 target assemblies made of

* Frontier Technology Development Section, Technology Development Division,
O-arai, Engineering Center.

** Innovative Technology Development Section, Nuclear Fuel Technology
Development Division, Tokai Works.

tungsten and its fuel part surrounding the target part consists of fuel assemblies made of TRU metal or oxide. Core height is 1 m. Four control rods are set in the core in order to get flat power density distribution there.

A proton linear accelerator of the capability of 500Mev and 10mA is adopted as the accelerator for the hybrid system. The proton accelerator is set at the south west direction part of the reactor where there are few buildings.

In addition to the above, reconstruction arrangements, items required to get a licence and R&D items are studied in this report.

目 次

1. 概要	1
2. 炉心	2
2. 1 TRU消滅処理概念	2
2. 2 炉心	2
3. 加速器の得失比較	9
3. 1 ハイブリッド用加速器としての得失比較	9
3. 2 加速器系の概念選定	10
4. 原子炉改造部分	13
4. 1 改造プラントの策定	13
4. 2 許認可項目及びR & D項目	18
5. おわりに	31
参考文献	32

表 リ ス ト

表 3. 1	ハイブリッド用加速器の得失比較	11
表 4. 1	炉心・原子炉構造の主要目	21

図 リ ス ト

図 2. 1	加速器・核分裂ハイブリッド炉のシステム概念	6
図 2. 2	「常陽」照射用炉心の装荷位置	7
図 2. 3	炉内構造物概略構造	8
図 3. 1	大電流加速器の基本構成	12
図 4. 1	炉心マトリックス	23
図 4. 2	原子炉容器内水平断面図	24
図 4. 3	原子炉構造・陽子ビーム入射系概念図	25
図 4. 4	プラント配置概念図	27
図 4. 5	現在の「常陽」原子炉構造断面図と回転プラグ構造図	29
図 4. 6	試料照射用試験装置	30

1. 概要

本報告書は昨年度の調査検討⁽¹⁾に続いて、加速器・核分裂炉ハイブリッド炉の炉心及び加速器系概念について検討したものである。

昨年度は加速器・核分裂炉ハイブリッド炉の技術的成立性を明らかにするために、日本原子力研究所(JABRI)、米国ロスアラモス国立研究所(LANL)、ブルックヘブン国立研究所(BNL)、ロシア物理研究所(ITEP)で提案されている種々のシステムにつき調査検討を行った。加速器・核分裂炉ハイブリッド炉は、その利用目的によって下記のとおりシステムの選択がある。

システム構成

中性子エネルギー	ターゲット	燃料	利用目的
fast	solid	MOX(Metal)	MA の消滅
fast	liquid	molten salt	MA の消滅
thermal	liquid	actinide slurry	MA, FPの消滅

昨年度の上記調査検討の結果、各種の加速器と核分裂炉を組み合わせたハイブリッド炉の中、最も実現性が高いものは固体ターゲットと固体燃料を組み合わせた概念であることが分かった。

この結果をうけて本年度は、「常陽」を例にとって未臨界の液体金属冷却高速炉(LMFR)と加速器とを組み合わせたハイブリッド炉概念の、さらなる検討を行うこととした。特に本年度の検討では、炉心、加速器系、及び炉の改造部分に焦点をあてて具体的に検討を行った。

2. 炉心

2. 1 TRU消滅処理概念

前章で記したように、種々の加速器・核分裂ハイブリッド炉の概念のうち、「常陽」をベースにしたものでTRU消滅処理を行うという研究目的に合致するものは、未臨界の液体金属冷却高速炉（LMFBR）と加速器とを組み合わせた概念である。

「常陽」の原型を出来る限り保ちつつ改造することを念頭に置いて、この概念につき検討する。この概念については、燃料ペレットの製造、スプレション中性子発生ターゲットやビーム窓の冷却構造の具体化や材料選定等に課題を残すものの、原子炉側の技術は現状のFBR開発で培ってきたものの延長線上にあると考えられる。従ってこの概念は、「常陽」の炉心部を改造して更に加速器を付加することで、比較的容易に実現しうるものである。よって本研究に合致するTRU消滅処理の概念として、下記のものを選択することとした。

加速器	陽子線形加速器
ターゲット	固体ターゲット（タングステン）
炉心燃料	ビームド型TRUペレット
冷却材	液体金属ナトリウム
消滅概念	高エネルギー陽子ビームによる核破碎反応により発生する中性子を1次中性子源とし、核分裂による未臨界増倍を利用して主に核分裂反応によってTRUを消滅（核変換）させる。
システム概念	図2.1に示す。

2.2 炉心

炉心概念を、「常陽」を用いて構築することについて検討を行う。「常陽」の原子炉容器の形状は内径3600mm、高さ約10mである。現状では、この容器内に熱出力100MWの炉心

(MK-Ⅱ)が設置されている。将来140MWに拡張される計画である(MK-Ⅲ)。ハイブリッド炉として改造を念頭においた場合の炉心概念の詳細は炉心設計検討に委ねる必要があるが、ここでは熱出力からMK-Ⅲ炉心の計画値である140MWを想定し、炉心形状もほぼそれと類似のものを想定することとした。

集合体の配列ピッチは必ずしも現状通りとする必要はないが、炉心支持構造物等の変更をなしとすることも考えてとりあえず現行通りの81.5mmとした。本システムの炉心部の発熱量(P)は、E-パワー(P_b)と未臨界増倍による核分裂パワー(P_f)である。

$$P = P_b + P_f \quad (2.1)$$

ここで、

$$P_b = E_b * I$$

$$P_f = E_f * F$$

P ; 発熱量 (MW)

E_b ; 陽子E-μのエネルギー (MeV)

I ; 陽子平均電流 (A)

E_f ; 核分裂当たりの発生エネルギー (MJ/fission; 約200MeV/fission)

F ; 未臨界増倍による全核分裂率 (fission/s)

$$F = S * P_b / (1 - k_{eff})$$

S ; 核破碎反応による単位時間当たりの中性子発生数 (n/s)

上記記号のうち、Sはターゲットの形状、材質及び入射陽子のエネルギーと電流値に依存する値である。従って、1GeV近傍の陽子エネルギーについては、入射エネルギーに依らずE-μパワーに比例すると近似すると、同一形状のターゲットについては、

$$F = k * P_b / (1 - k_{eff})$$

k ; ターゲットの核破碎反応による中性子発生効率を表す定数

となり、(2.1)式は次の通り表せる。

$$\begin{aligned}
 P &= P_b + P_f \\
 &= P_b + E_f \cdot k \cdot P_b / (1 - k_{eff}) \\
 &= P_b \cdot (1 + E_f \cdot k / (1 - k_{eff}))
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

(2.2) 式によれば炉心部の発熱量は陽子のE-パワー (P_b) に比例し、また未臨界増倍度 ($1/(1-k_{eff})$) に概ね比例する。

日本原子力研究所 (原研) で検討している陽子加速器を用いた消滅処理プラント⁽¹⁾ の例では、58.5MW (1.5GeV, 39mA) のE-パワーの入射に対し、 $k_{eff}=0.89$ のときに発熱量が820MWである。「常陽」改造後の炉心の未臨界度を同様の $k_{eff}=0.89$ となるようにすれば、(2.1) 式の右辺の () 内は同一となるので、 P_b と P とは比例する。「常陽」の炉出力は140MWであるので上記例の1/5.8である。従って、E-パワーも比例して58.5MWの1/5.8でよいとすると、E-エネルギーが1.5GeVの場合、1.5GeV-7mAの組み合わせとなる。E-エネルギーは最小500MeV程度から核破砕は可能であるため、E-エネルギーを小さくする場合には500MeV-21mAの陽子E-μの選択も可能性がある。加速器として線形加速器 (リニアック) を想定する限り、大電流化の可能性が高いのでターゲットや加速器への負担の面からE-エネルギーが低い後者の方が望ましい。

しかし、使用する加速器としてサイクロトロンやシンクロトロン円形加速器を想定する場合には、逆にエネルギーを更に大きくして、電流値を小さくする方が望ましい。

図2.1、図2.2に炉心部の概念を示す。ターゲット部はタングステンを、燃料部はステンレス被覆のTRU金属燃料またはTRU酸化物とする。炉心高さを1mとした。下記に各部の発熱密度を示す。

	集合体数	体積 (ℓ)	発熱量 (MW)	発熱密度 (W/cc)
ターゲット部	19	109.3	20	182.4
炉心燃料部	98	563.7	120	212.9

原研の大型ハドロン計画の陽子加速器（1GeV）については10m近いコンクリート遮蔽が想定されていることから考えるとターゲット部、炉心部のスプレション反応で発生する高エネルギー中性子（特に100MeV以上）を遮蔽することは容易でないことが予想される⁽²⁾。定量的な遮蔽厚さの判断は今後の遮蔽評価の結果に委ねるものとしてとりあえず原子炉容器内の遮蔽を強化しておく為に、炉容器内の燃料貯蔵ポット（30箇所程度設置）を固定遮蔽体領域と改造することが望ましい。

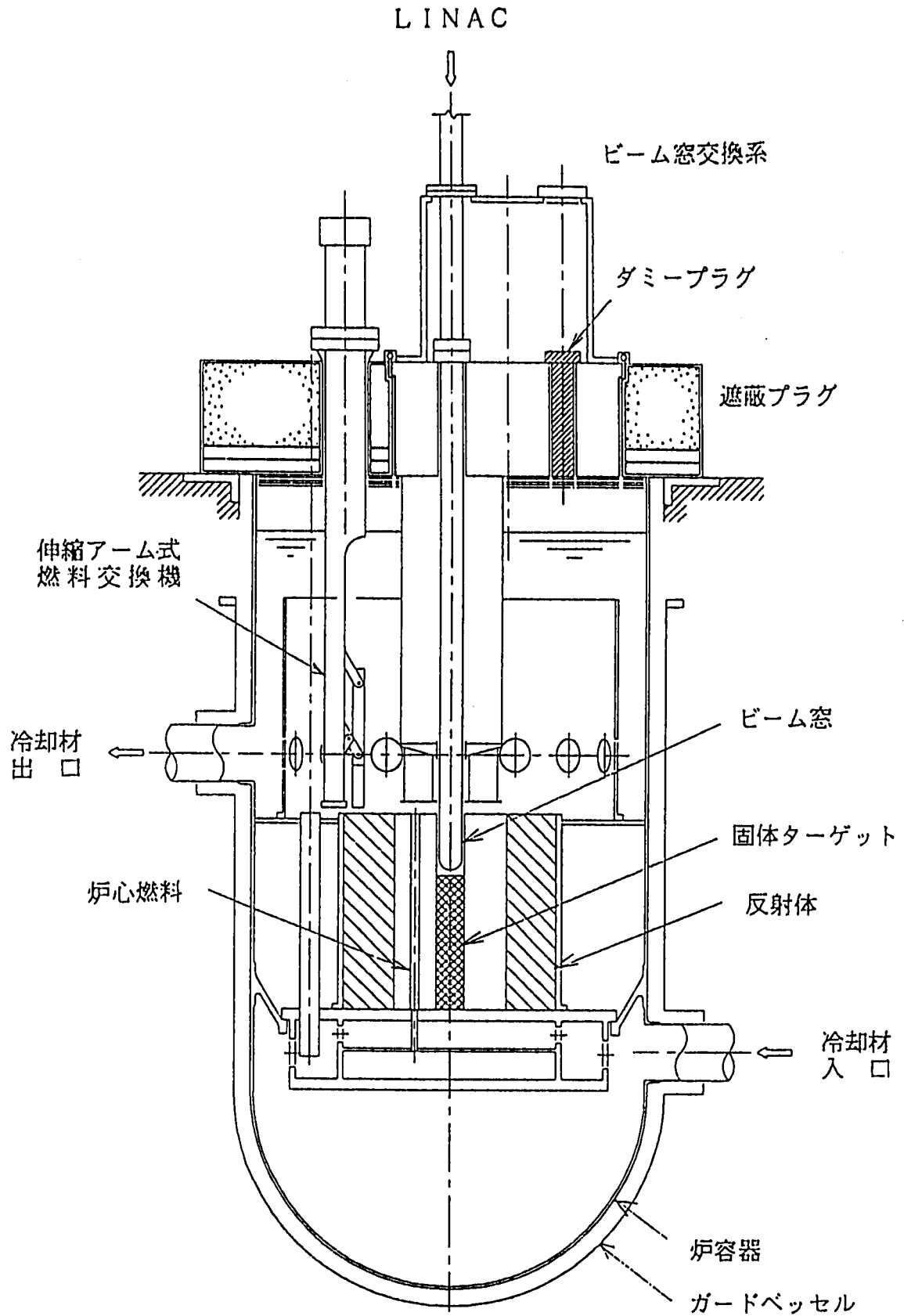
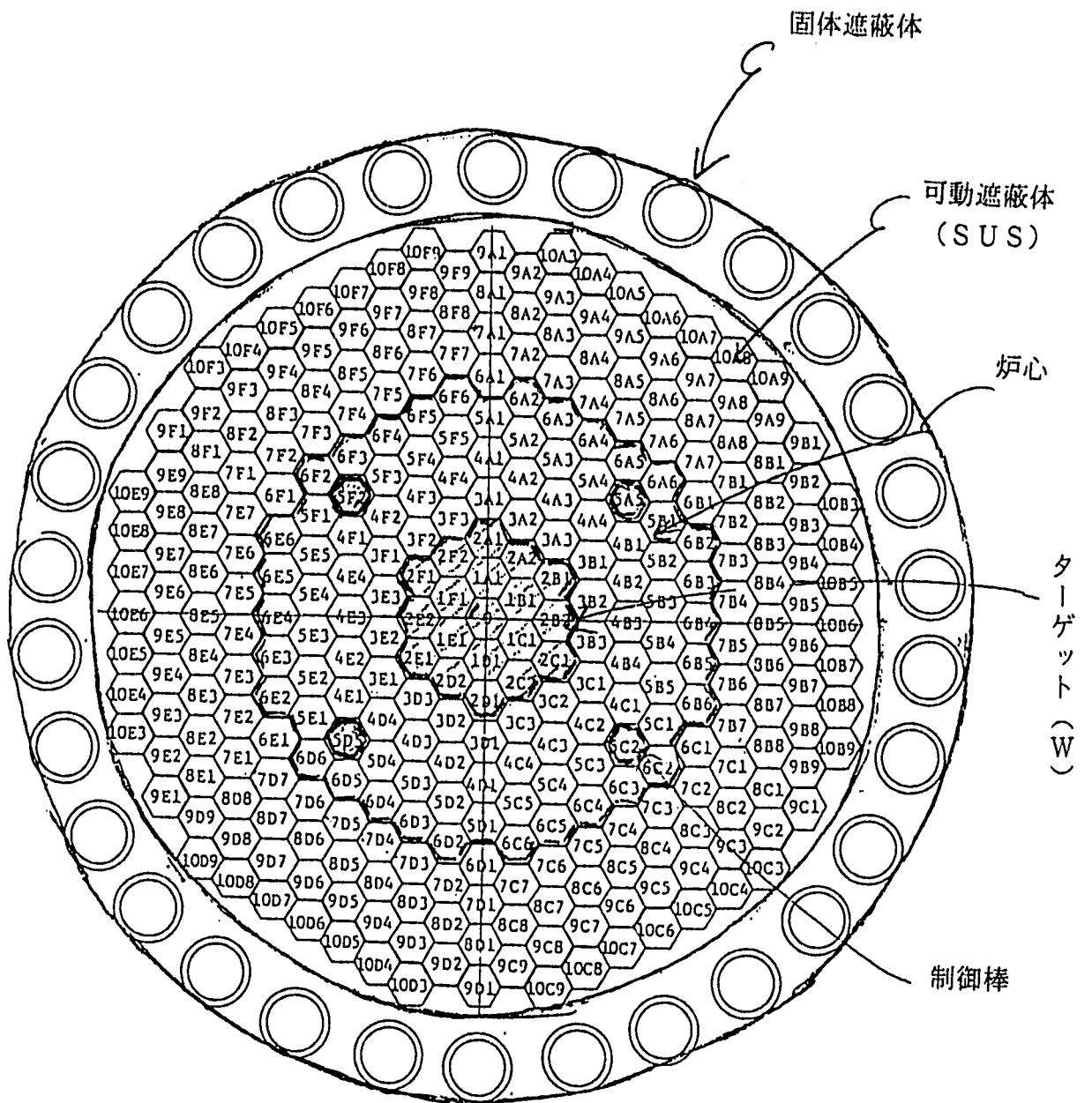


図 2. 1 加速器・核分裂ハイブリッド炉のシステム概念



ターゲット集合体	19
炉心燃料集合体	98
制御棒	4

図 2. 2 「常陽」照射用炉心の装荷位置

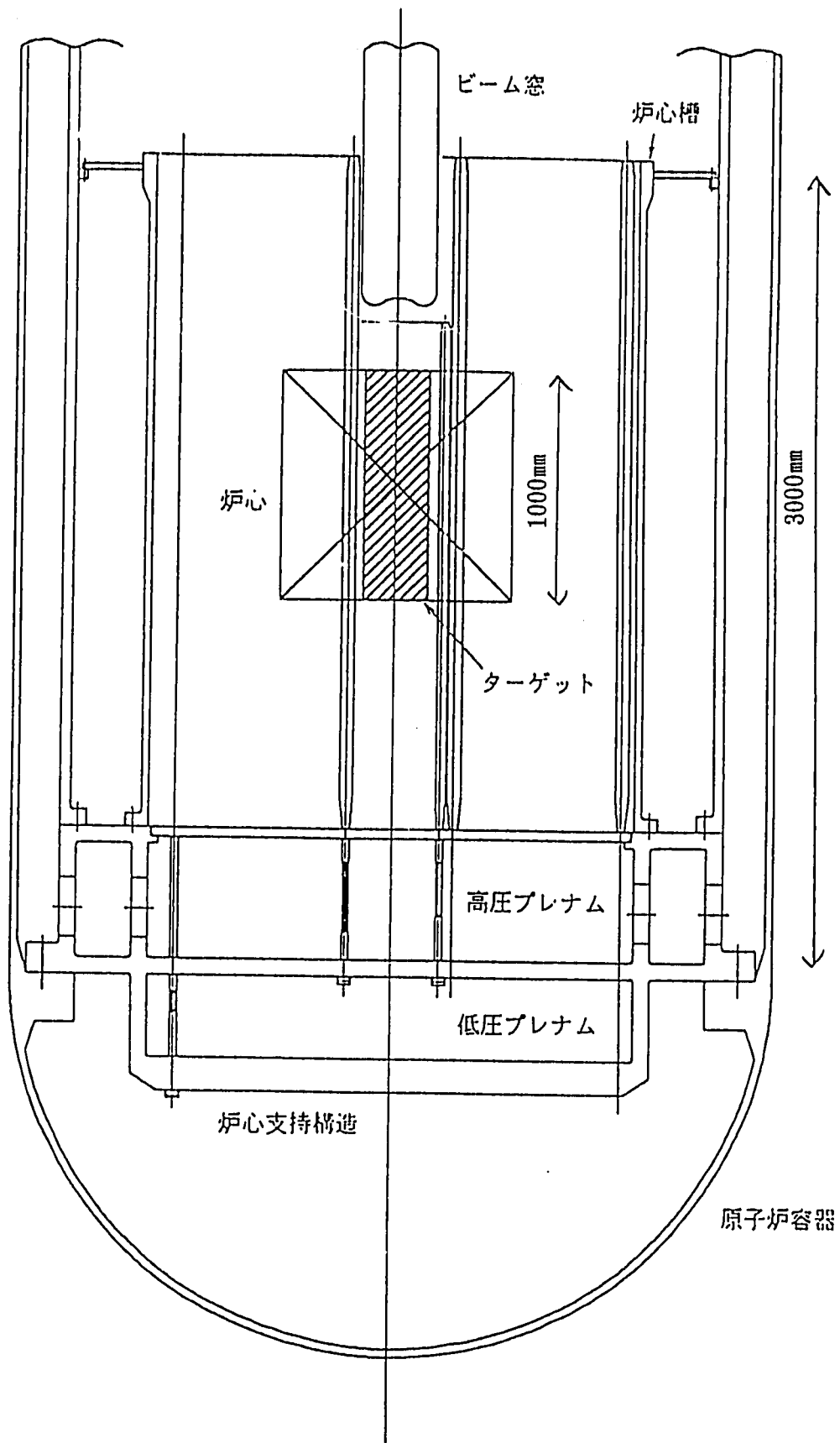


図 2. 3 炉内構造物概略構造

3. 加速器の得失比較

3.1 ハイブリッド用加速器としての得失比較

電子線形加速器、陽子線形加速器、陽子用サイクロトロン他の概念について、ハイブリッド用加速器としての得失を比較整理するために各機関で提案されているハイブリッド加速器炉のエネルギー収支を表3.1にまとめた。

○エネルギー収支の検討

以前の検討⁽¹⁾に従って消滅処理効率を、TRU核種を1個消滅させるのに必要な、荷電粒子1個当たりの加速エネルギーで示すこととする。

計算を簡単にするために以下の通り仮定する。

- ・ハイブリッド炉の稼働率を100%とする。
- ・TRUの質量数は240とする。

効率はTRU核種を1個消滅させるのに必要なビームエネルギーであるので、下記の通りになる。

$$\text{効率} = 0.07855 * (\text{加速エネルギー; MeV}) * (\text{加速電流; mA}) / (\text{年間消滅量; kg})$$

各種加速器のうち電子線形加速器に対する検討は¹³⁷Csを対象に動燃にて行われており、効率が3000MeVの結果となっている。¹³⁷Csの(γ, n)反応断面積を300mbに対してTRU(Np, AM)の($\gamma, fission$)反応断面積を1barnと仮定し、また、光核反応との競合過程となる電子対生成断面積は原子番号Zの2乗に比例すると仮定して外挿すると、 $k_{eff} = 0.9$ での未臨界増倍を考慮した場合、

$$\begin{aligned} \text{効率} &= 3000\text{MeV} * (300/1000) * (93/55)^2 * (1-0.9) \\ &= 257\text{MeV} \end{aligned}$$

となるが、この値は表 3. 1 に示すように、陽子加速器に対するものよりも悪い値となっている。

3.2 加速器系の概念選定

表3.1によればTRU核種を消滅させるのに必要なエネルギー効率はや質子加速器の方が電子加速器よりも小さい。また、陽子加速器に対しては線形加速器とサイクロトロンとでは表3.1では差が見えていない。しかしながら、加速電流について考えると、3段階程度の多段構成にしてもサイクロトロンで15mAの電流を加速することは、かなり困難な状況が予想される。本検討においては第2章記載の炉心計画からの要求条件を満たし得る加速器系の概念として、陽子線形加速器を選定することとした。

加速器系の構成概念を図3.1に示す。

表3. 1 ハイブリッド用加速器の得失比較

比較項目		実効増倍率	加速エネルギー	加速電流	年間消滅量	効率*	備考
加速器種類	原子炉システム	keff	MeV	mA	kg	MeV	
線形陽子	液体金属冷却FBR	0.89	1500	39	250	18.4	原研オメガ計画
線形陽子	重水減速アクチニドスラリー	0.81 0.93-0.95	1600	250	625 2500	50.3 12.6	ロスアラモス研究所
線形陽子	液体金属冷却FBR	0.90	1600	104	2600	5.0	フェニックス研究所 (PHENIX)
陽子マイクロロン	LMFBR	0.9-0.95	2000 -3000	15	250	9.4 -14.1	フェニックス研究所
線形電子	液体金属冷却FBR	0.9	100			260**	動燃事業団

*効率はTRU核種を1個消滅させるのに必要なビームエネルギーで示す。

すなわち、

$$\text{効率} = 0.07855 * (\text{加速エネルギー; MeV}) * (\text{加速電流; mA}) / (\text{年間消滅量; kg})$$

** 電子線形加速器の検討はCS137を対象に行われており、3000MeVの結果となっている。CS137の (γ, n) 反応断面積を300mbに対して、TRU(Np, AM)の $(\gamma, \text{fission})$ 反応断面積を1barnと仮定した。また、光核反応との競合過程となる電子対生成断面積は原子番号Zの2乗に比例すると仮定して外挿した。keff=0.9での未臨界増倍を考慮した。断面積について、Zの4乗に比例する成分を考慮すると効率は更に悪くなる。

$$\text{効率} = 3000\text{MeV} * (300/1000) * (93/55)^2 * (1-0.9)$$

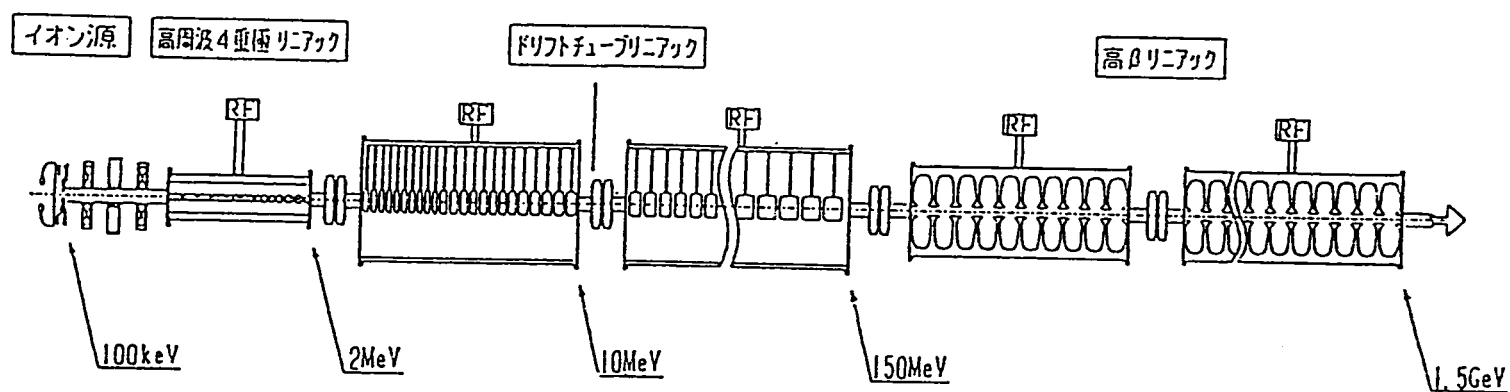


図 3. 1 大電流加速器の基本構成

4. 原子炉改造部分

4.1 改造プラントの策定

「常陽」を改造して消滅処理プラントに変更する場合の考え方として、下記の2通りの考え方がある。

- ① 消滅処理プラントとして消滅処理量の点で十分な性能を発揮できるのなら、原子炉容器を残して原子炉構造は大々的に改造する。
- ② 消滅処理プラントとしての特性把握を主眼とし、炉心体系をバトリックに変更し、実験データの取得と消滅処理の実績をあげることを目的とする。従って、「常陽」の原型をできるだけ保つこととする。

①の原子炉構造の改造レベルについては、炉心上部機構だけの取り替え、炉内構造物までの取り替え、ひいては原子炉容器を含む原子炉構造全体の取り替え等考えられるが、炉内構造物を取り替える場合は全炉心退避、原子炉容器内ナトリウムの全ドレン、大・小回転プラグの取り外し等使用済み燃料貯蔵ピットの増設、放射化ナトリウムの貯蔵タンクの増設、放射化した大・小回転プラグ等の大型機器用のメンテナンスキャクスクの準備等が大工事となり、原子炉構造全体の取り替えと差異のない改造となってしまう。また、これほどの大工事でも炉内構造物を取り替えても、原子炉容器も中性子による照射損傷を受けており、従って原子炉構造全体の改造の方がまだしも合理的であろう。しかし原子炉構造の取り替えとなると、プラントのデコミッションとなり、サイトだけが確保されたハイブリッド炉の建設とも言える大工事となってしまう。一方、炉心上部機構の取り替えについては、「常陽」の場合その直径が約1 m程度に過ぎず、炉心退避やナトリウムの全ドレンを行わなくとも対応できることが予想される。よって、炉内構造物の取り替えと炉心上部機構の取り替えとは雲泥の差がある。但し、炉心上部機構の軸長は長く、放射化しているので、その対策は予め講じておく必要がある。

従って、本検討では、改造プラント構想をできるだけ現実的なものとして捉えることが

できるように、炉心上部機構までの取り替えを暫定条件として、②の条件で検討を行うものとした。（この結果として、得られたプラントの性能評価は今後の検討課題として4.2(2)に取り上げている。）

(1) プラント概念

原子炉構造概念を検討するにあたり、以下の前提条件とした。

① 炉停止、反応度制御

未臨界炉であり、基本的に陽子加速器を停止することによって、炉も停止できるものとする。但し、炉心の出力平坦化のため制御棒を設けるものとする。

② 炉心冷却

炉心燃料集合体一体あたりの発熱量は、「常陽」MK-Ⅲ並みであるので炉心燃料集合体一体あたりの冷却流量も同程度となる。（炉心高さは約2倍のため発熱密度は約1/2である）従って基本的に炉心出入口温度条件はほぼ「常陽」並みとする。ターゲット集合体の発熱量は炉心燃料集合体の発熱量以下であるから、「常陽」MK-Ⅲの炉心燃料集合体一体あたりの冷却流量以下である。従って、炉心冷却は「常陽」一次系流量で可能であり、冷却系の改造は必要としない。

また、原子炉構造概念を策定するにあたり、「常陽」の原型をできるだけ保つこととするので、先ず原子炉構造概念に大きな影響を与える炉内構造物、燃料交換方式について検討した。

炉内構造物については上記の炉心冷却の観点から、「常陽」の炉心流量配分の範囲内で成立の見通しのあること及び、炉内構造物の取り替えは極めて困難であることから、炉内構造物はそのまま流用するとすると、永久構造物である連結管が高圧プレナムに対して開口しているのは（中心の集合体を0列とし）6列目までであり、（但し、6コーナーの位置については開口せず）炉心燃料集合体、ターゲット集合体、及び制御棒の総本数は121体となる。ここでは6列目と5列目の一部を内側反射体とし、内側反射体のイントランスナル側部に高圧プレナムと連通する開口を設けず、イントランスナル下端に開口を設けて下部の低圧プレナムと連通させて、流量を抑制しているが、高圧プレナムに連通する

ようにオリフィス孔を設けることで炉心燃料集合体並みの流量を得ることが出来る。またターゲット集合体の範囲については炉心特性から定めるべきであるが、構造側からの要求としてビーム窓の断面形状が六角となると、ビーム窓構造の熱応力が厳しくなることが予想されるため、円筒形状で収まる2列目までをターゲット集合体領域の目安として、炉心特性においても特に問題のないことを確認し、ターゲット集合体本数を19体とした。従ってその外側の環状領域を炉心燃料集合体とし当該領域の出力平坦化のため、制御棒を4体設置した。炉心マトリックスを図4.1に示す。

燃料交換方式については、大別すると回転プラグ方式、ホットセル方式、それにPNC大型炉で検討されている引き抜き方式がある。上記の通り「常陽」の炉心マトリックスがそのまま残り、「常陽」の原型を保てること、またハイブリッド炉は炉心体系をマトリックスに変えてみて、その炉心特性を調べるという実験炉的位置づけの炉であるから、頻りに燃料交換することが予想される。このため、今までの技術の蓄積を利用できメンテナンス性（ビーム窓交換等）が良く、且つ燃料交換作業が容易な従来通りの直動式燃交機2重回転プラグ方式とした。

このようにすれば原子炉構造における改造範囲は、ビーム窓を新設し、制御棒駆動機構位置を変更することに伴う炉心上部機構の変更だけに止まる。炉心マトリックスに対するビーム窓、炉心上部機構、小回転プラグ、大回転プラグ、原子炉容器の水平断面での位置関係を図4.2に示す。また、炉心・原子炉構造主要目を表4.1に、原子炉構造・陽子ビーム入射系立面を図4.3に示す。

次に陽子加速器の配置について検討する。陽子ビーム入射系に関しては図4.3の原子炉構造立面に示した通り、ほぼ原子炉建物の2階レベルに設置することとした。そして施設全体配置図に基づいて検討した結果、他の建屋との干渉が少ない南西の方向に、夏海湖の一部を埋め立てて、陽子加速器用建屋を設置することとした。プラント配置概念図を図4.4に示す。原子炉建物の外部配置については「常陽」原子炉建物から南西の方向約500mの所に入射部建物を設けた。リニアック陽子加速器の能力を500MeV-10mAとした。ビームラインは遮蔽等の観点より地下約25mの深さとし、「常陽」の原子炉建物の近傍に設けたビームベンダー建物においてビームを2回曲げて原子炉建物の2階レベルまでビームレベルを立ち上げてから原子炉格納容器内に導いた。尚、ビームベン

ダー建物内にはビームを曲げる前に、予め照射特性を見るための照射施設を設けた。

(2) 改造工事の検討

図4.5に現状の「常陽」原子炉本体断面図（設置許可申請書より）と回転プラグ構造図を示す。ハイブリッド炉への原子炉構造の改造は基本的に炉心上部機構の取り替えだけであるが、回転プラグ構造図に示す通り回転プラグの上面配置は極めて窮屈であり、炉心上部機構の取り替えは容易ではない。特に、炉心上部機構のフランジと小回転プラグ持上装置の隙間は狭く小回転プラグ上面に直に炉心上部機構用のメンテナンスキャスクを立てることができない。このためメンテナンスキャスクを立てるのは運転床面のピット蓋上面とし、プラグ上面とピット蓋下面間には、炉心上部機構引き抜き時にナトリウムミストがプラグ床面に飛散しないようステンレスメッシュ等のフレキシブルで、且つシール機能を有した蛇腹を設ける。

原子炉構造側の主な改造手順を下記に示す。

① 炉心体系の変更

既存の燃料交換システムにより、ハイブリッド炉用の未臨界の炉心体系を構築する。

② ピット蓋、シール用蛇腹の設置

③ ドアバルブ、炉心上部機構用キャスクの設置

ピット蓋上にドアバルブ、炉心上部機構用キャスクを設置する。このキャスクは、付着したNa, CPや放射化した炉心上部機構に対して十分な遮蔽機能を有すると共に、炉心上部機構持ち上げ用のクレーンを内蔵している。

④ 炉心上部機構の引き抜き

制御棒駆動機構ごと炉心上部機構を引き抜いた後、ハイブリッド炉用に新規に製作した炉心上部機構を装荷する。この炉心上部機構には予めビーム窓は設置されているが、制御棒駆動機構4体については、炉心上部機構設置後個別に据え付ける。

⑤ 陽子ビーム体系との結合

炉心上部機構上部にあるビーム窓フランジにおいて陽子ビーム系と接続し、入射ラインを真空、またはHe雰囲気とする。

(3) ビーム窓昇降対策及び試料照射用試験装置について

① ビーム窓昇降対策

ビームライン下端のビーム窓は、陽子ビーム入射時にはビーム窓の冷却機能を確保しつつ、できるだけナトリウム層を浅くしてターゲットに近づけることが中性子発生効率を高める上で大切である。一方、ビーム窓を燃料集合体の頂部より下方に差し込んだままでは、回転プラグを回すことができないので、燃料交換時にはビーム窓を引き抜く必要がある。そこで図4.6に示すように、回転プラグ上面のビームラインに真空バウンダリー用のベローズとカバーガスバウンダリー用のベローズを設け、これらの伸縮により燃料交換システムに適合させることとした。ストロークはビーム窓の挿入深度が燃料集合体頂部より約1 mであることから、ベローズ長は約1.3m (縮) ~ 2.3m (伸) とし、これらのベローズはできるだけ環境条件の良い回転プラグの上面に設けている。ビームラインと炉心上部機構の隙間には他の貫通部同様ナトリウムベーパー蒸着防止用にアルゴンガスをわずかにブローしている。また、ターゲット集合体はこのようなビーム窓の昇降に合わせるため、周囲の炉心燃料集合体より約1 m短くし、燃料交換機についてもこの短い集合体を取り扱えるように昇降ストロークを約1 m長くしておく。

② 試料照射用試験装置

ハイブリッド炉の試験としては、炉心体系を種々変更して炉心特性を把握する試験が主体となるため、炉心体系の変更に伴う燃料交換システムの運転操作が必要となるが、このような大がかりな試験手順以外に、設定された照射場の中性子フラックスの測定や照射による試料特性を把握するため、オンパワーで測定できる試料照射用試験装置を設置しておく、比較的簡単な操作により早期に試料照射結果を得ることが出来る。このような照射用試験装置は既に「常陽」に多いが (INTA : 計測線付燃料集合体、LTTL : 炉内低温照射用ループ、MARICO : 温度制御型材料照射装置、FLORA : 流量制御型照射装置) いずれも、オンパワーで試料を取り出すような装置ではない。オンパワーで試料を取り出す装置としては、J M T R の水カラビット照射設備の例 (炉内2重管構造とし、内側管の下端に外側アニュラスとの連通孔を設けておき、ラビットを内側管に装填し、挿入するときは冷却水を内側管から外側アニュラスに流してラビットを押し込み、取り出し時

には冷却水を逆流させてラビットを取り出す。)があるが、この場合は水炉であるから燃料交換の拘束条件がなく、常時設置しておく構造がとれる。従って上記要求条件を満たす試料照射用試験装置の基本概念としては、ビーム窓と同様に昇降のための真空用ならびにカバーガス用ベローズを設け、且つJ M T Rの水力ラビット照射設備のように炉内2重管構造とする。尚、2重管構造ではあるが、装置内部に内側管用昇降装置を収納することは困難なため内側管にはベローズを設けず、装置全体の昇降動作に対しては、この装置の外側のラピッド挿入管、冷却材管にそれぞれ十分な長さのフレキシブル管を設けて変位吸収し、特にラピッド管については挿入に支障のない大きな曲率を確保して対応する。冷却材については、炉内まで挿入するため、ナトリウムとの共存性及び大きな放射線遮蔽効果を考えて、Pb-Biのような低融点の液体金属を候補材として考える。また、試料照射用試験装置に対応する位置は炉心領域内(ターゲット領域の外側で可動遮蔽体内側の炉心上端付近の領域)で、燃料集合体頂部からストローク分約1 mはボイドの特殊炉心燃料集合体を装荷し、このボイド範囲において試料照射用試験装置を上下させる。

以上、ビーム窓の昇降対策と試料照射用試験装置の基本的な構想について述べたが、この装置について特に配慮すべき点は遮蔽とこれに伴う配置である。ビームラインはその目的から空洞とせざるを得ず、炉上部のビームライン外側において遮蔽対策を施す必要があること、更に加えてビーム窓昇降装置、試料照射用試験装置昇降装置等の設備を設けなければならないことなど配置上の課題があり、それだけでなくも込み合っている小回転プラグ上にそのスペースが確保できるかどうか、これら機器自身の構造概念の検討と併せて今後十分なる検討を踏まえてその採否を決めてゆく必要がある。

4.2 許認可項目及びR & D項目

ハイブリッド用の改造プラントとしての許認可性を検討し(従って、陽子ビーム系につ

からの課題であり、許認可以前の問題といえるかもしれない。

(2) R & D項目

① 材料劣化の把握

サーベイランスによる加速試験片の分析を行い、現状での中性子による損傷程度を明らかにする。

② 材料強度基準

現在の材料強度基準はある程度保守的に設定されているものと考えられるので、材料としてどの程度まで許容できるかその限界を明らかにする。

③ MA, FPを含む炉心燃料の製作性検討

④ 改造プラントの設計

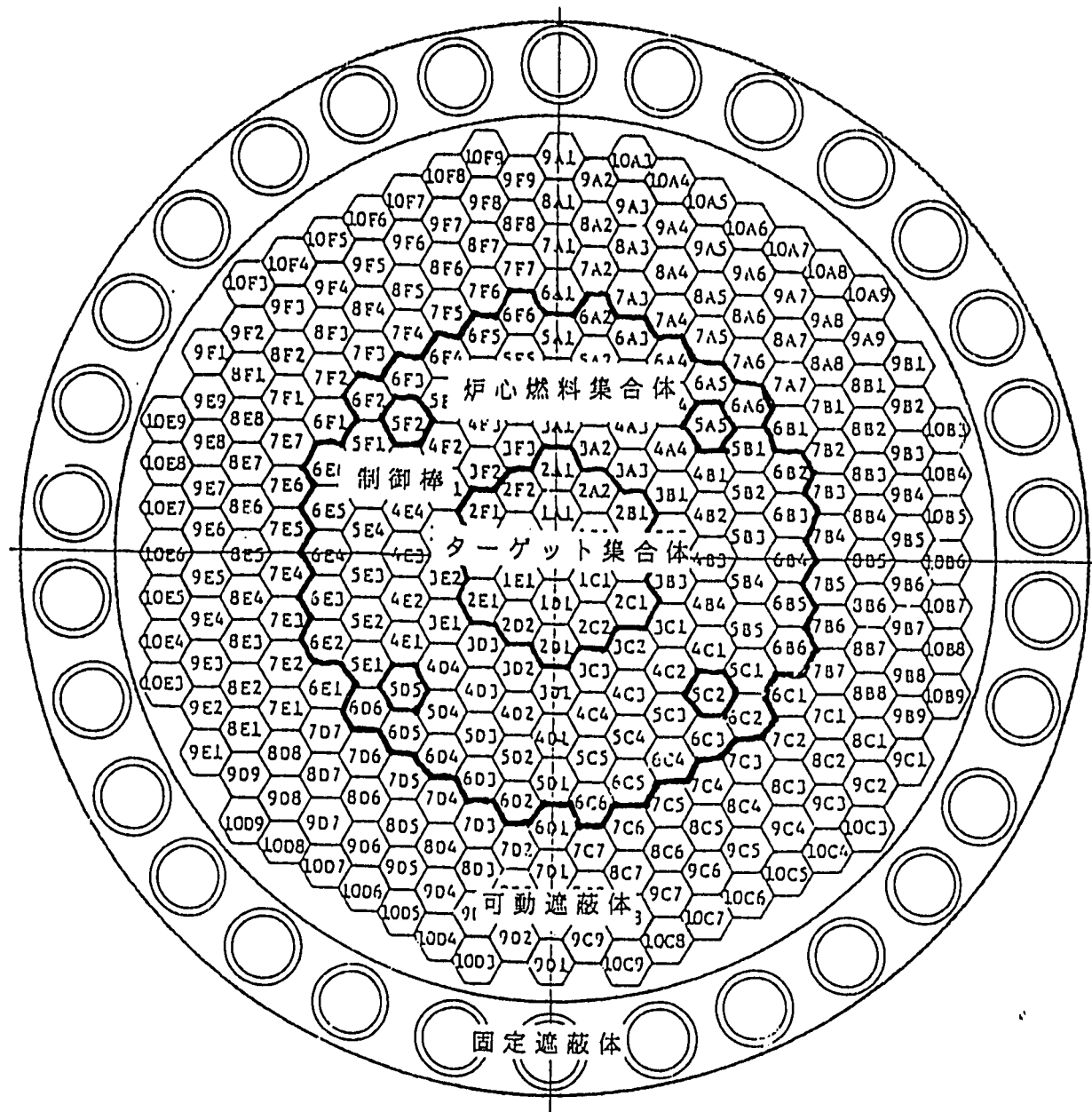
- 炉心設計（核設計、燃料設計）
- 遮蔽設計（固定遮蔽体の評価等）
- 安全設計（想定事故と安全性評価）
- システム設計（ループの運転性検討、計装計画、保守・補修システム）
- 構造設計（原子炉構造、燃料交換・取扱設備）
- 建屋設計（炉上部建屋の改造、陽子加速器建屋）

⑤ 改造プラントの性能評価

「常陽」の原型をできるだけ保つことを前提に検討した当該プラントの性能（消滅処理量）を評価する。（もしも性能的に著しく劣る場合は4.1に記載した通り、改めて原子炉構造の大々的な変更を条件に検討する必要があるが、原子炉容器から作り替えることは、新規プラントを建設するのに近いと考えられる。）

表 4. 1 炉心・原子炉構造の主要目

項 目	仕 様 等 の 例
<p>[炉心]</p> <p>熱出力</p> <p>① 燃料</p> <p>型式</p> <p>ペレット</p> <p>被覆管材質</p> <p>集合体本数</p> <p>② ターゲット</p> <p>形状</p> <p>材質</p> <p>集合体本数</p> <p>③ 制御棒</p> <p>型式</p> <p>ペレット</p> <p>集合体本数</p> <p>④ 遮蔽体</p> <p>可動遮蔽体 型式</p> <p>集合体本数</p> <p>固定遮蔽体 型式</p> <p>集合体本数</p>	<p>約 1 4 0 MW</p> <p>ピンバンドル型</p> <p>T R U ペレット</p> <p>O D S 鋼</p> <p>9 8 体</p> <p>ターゲット集合体</p> <p>タングステン</p> <p>1 9 体</p> <p>ピンバンドル型</p> <p>B , C ペレット</p> <p>4 体</p> <p>S U S ブロック型</p> <p>2 8 2 体</p> <p>S U S ブロック型</p> <p>3 0 体</p>
<p>[原子炉構造]</p> <p>① 炉内構造物</p> <p>構成</p>	<p>基本的に常陽の原子炉構造であり、 常陽と異なる点は炉心上部機構である</p> <p>炉心支持板、支持構造物、炉心ハレル</p>



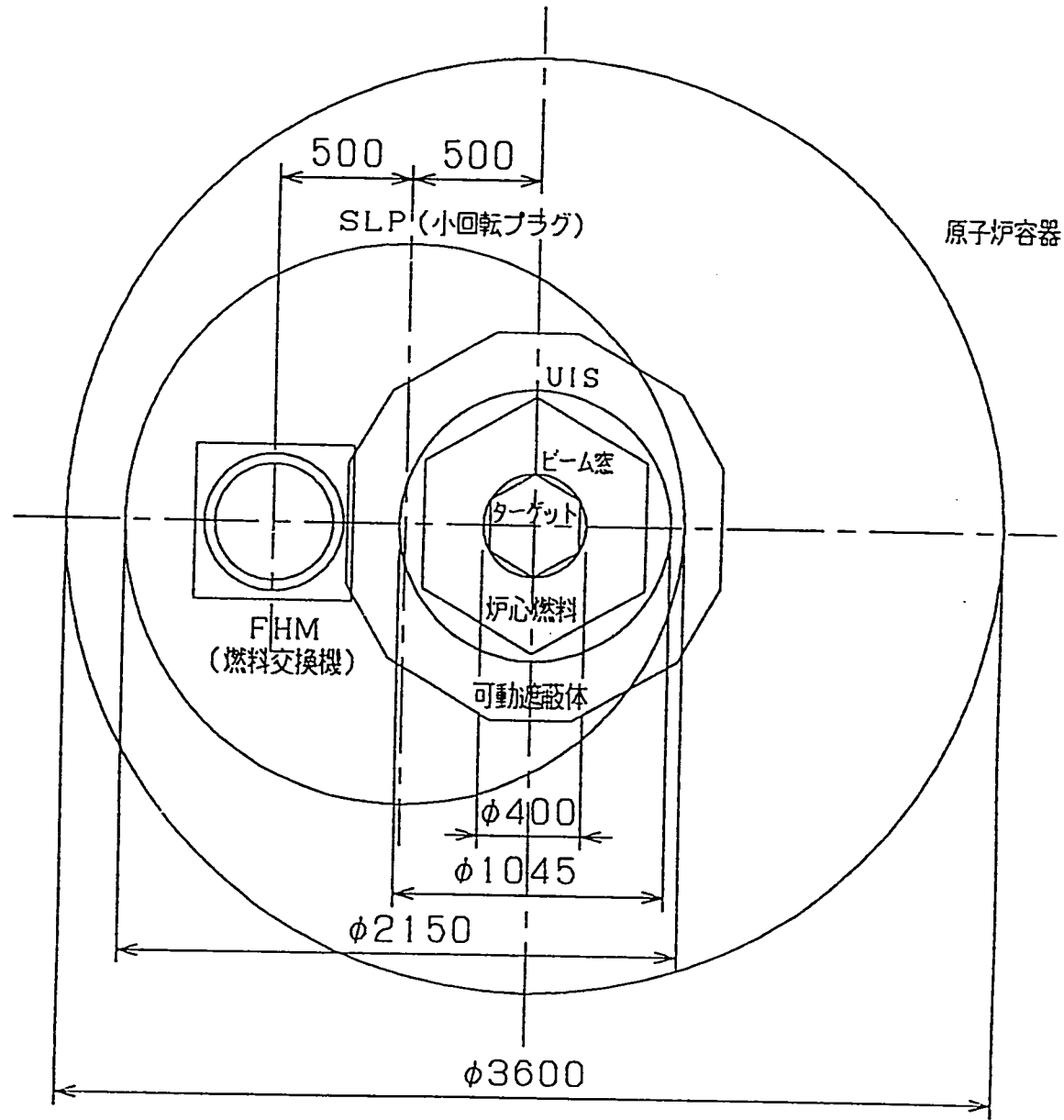


図 4. 2 原子炉容器内水平断面図

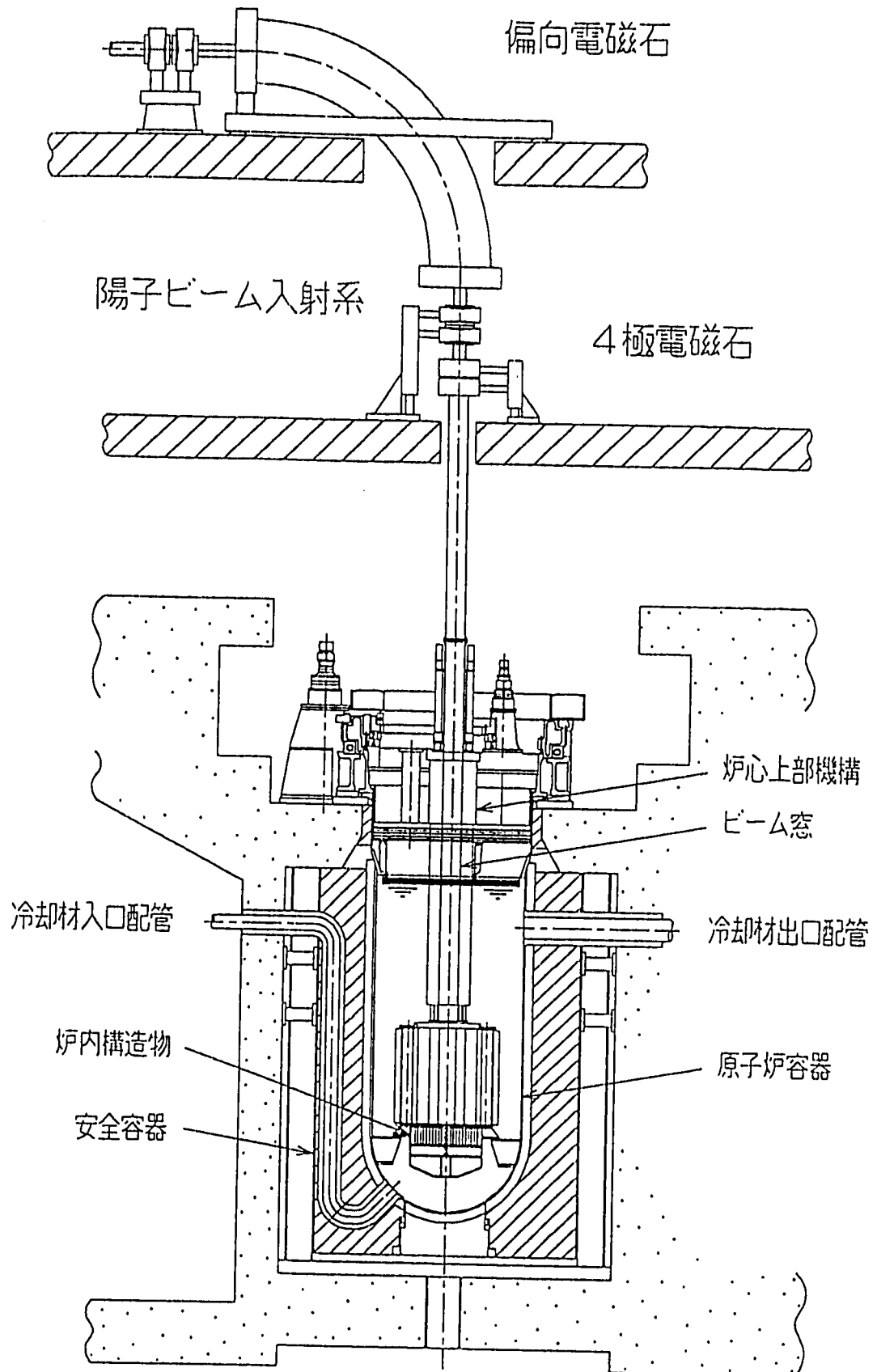
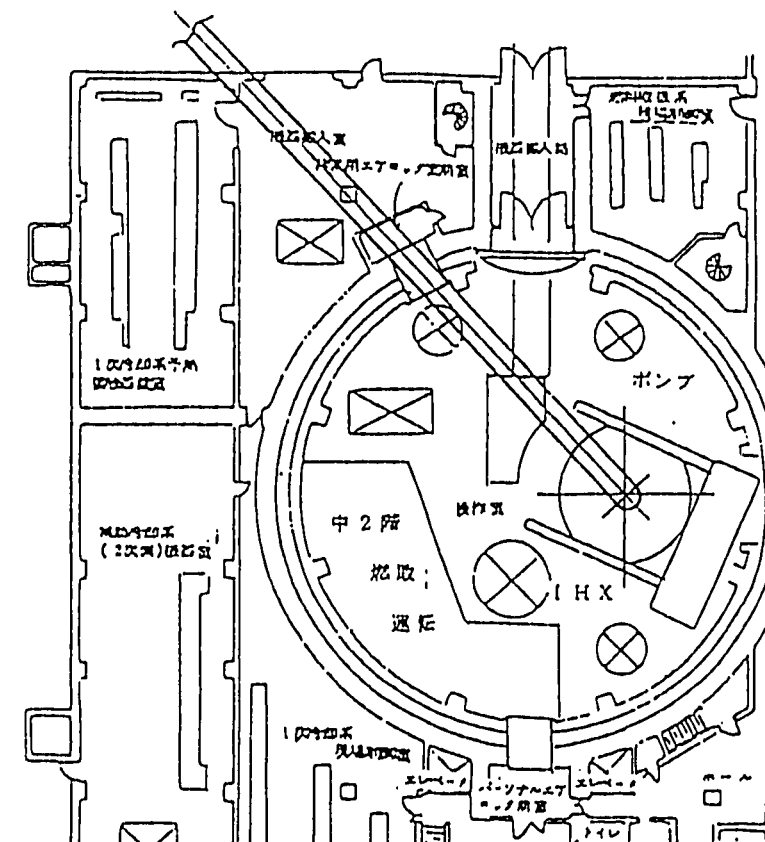
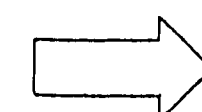
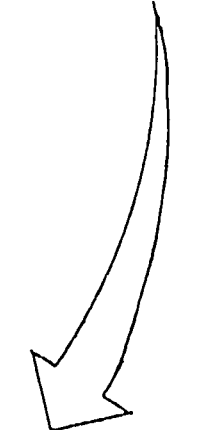
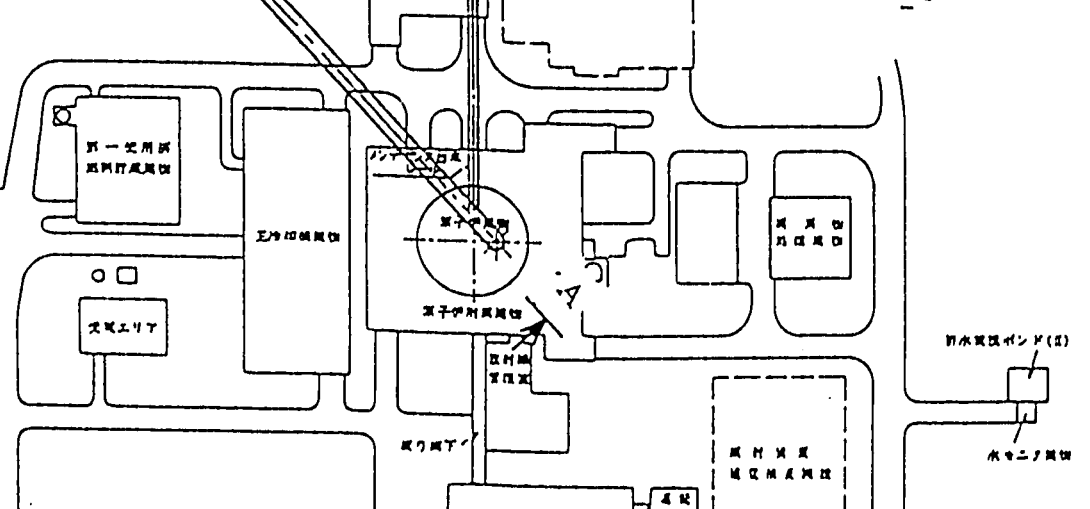
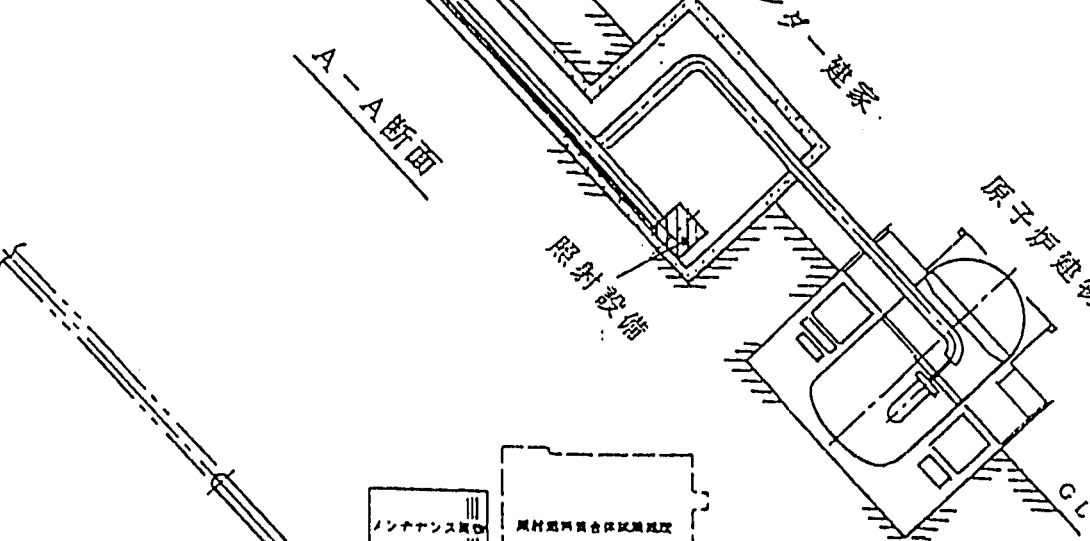
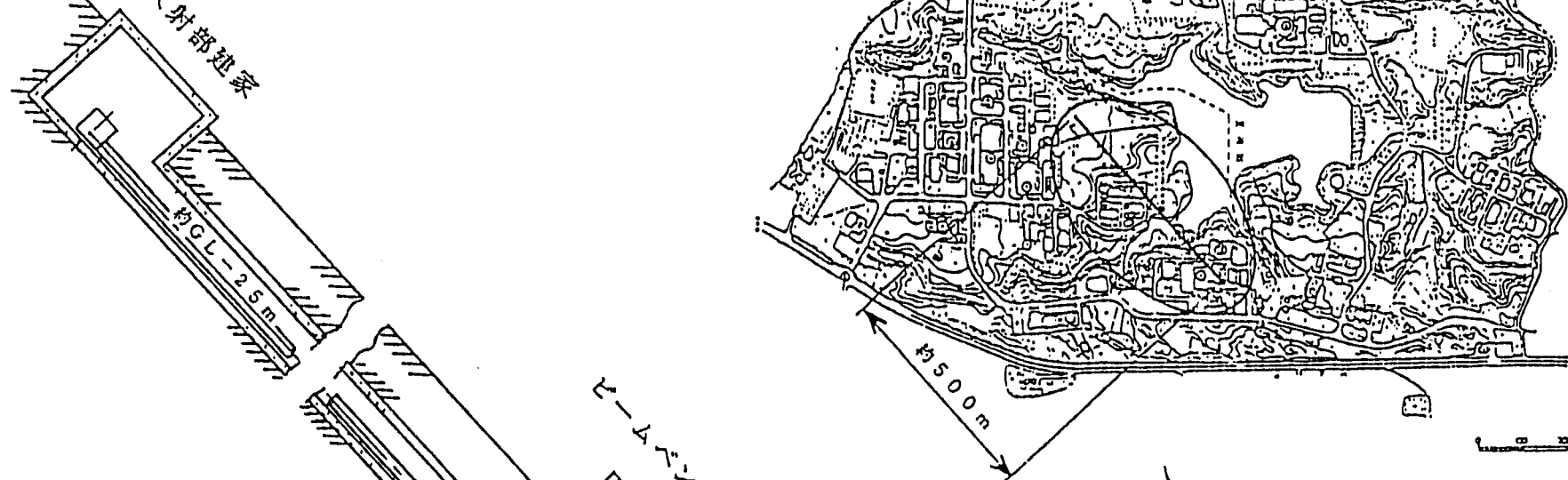
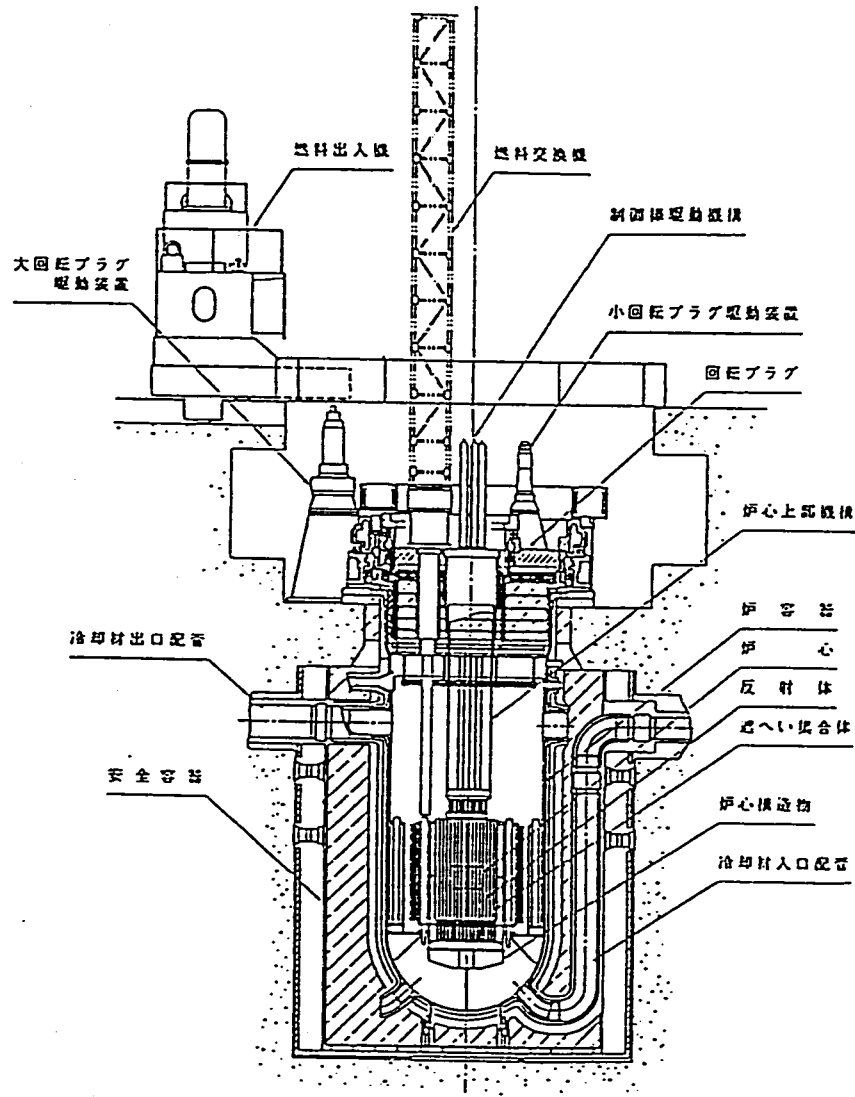
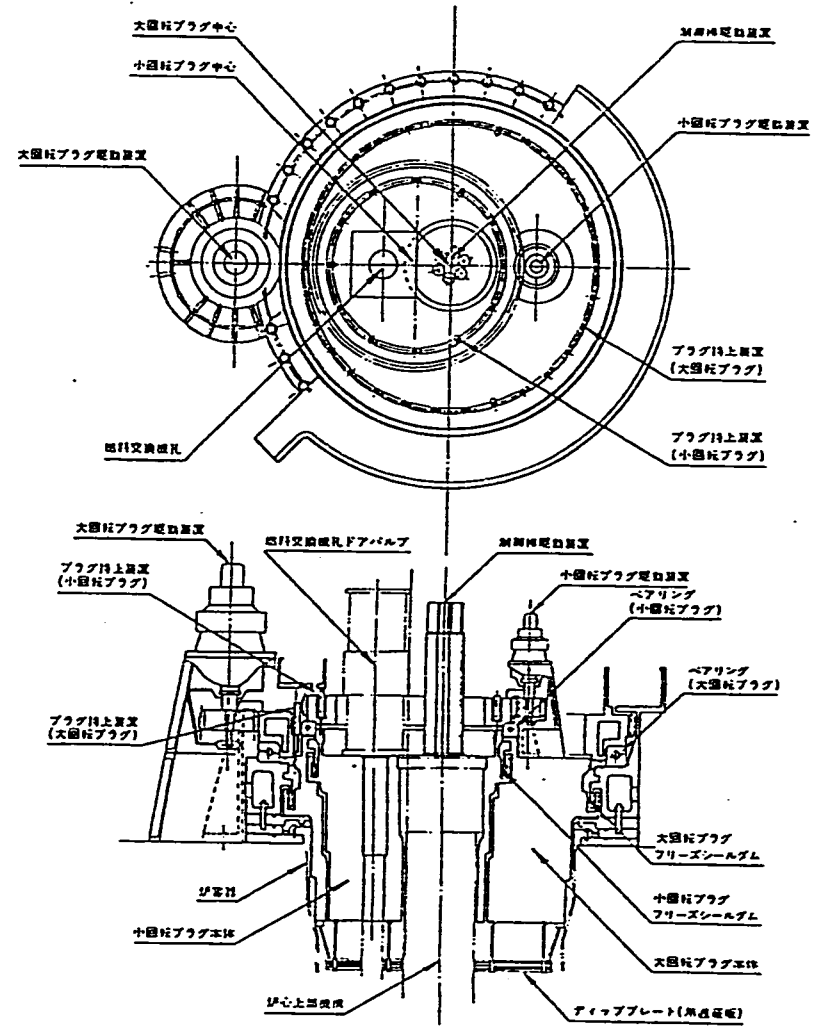


図 4. 3 原子炉構造・陽子ビーム入射系概念図





原子炉本体断面図 (参考用)



回転プラグ構造図

図 4. 5 現在の「常陽」原子炉構造断面図と回転プラグ構造図

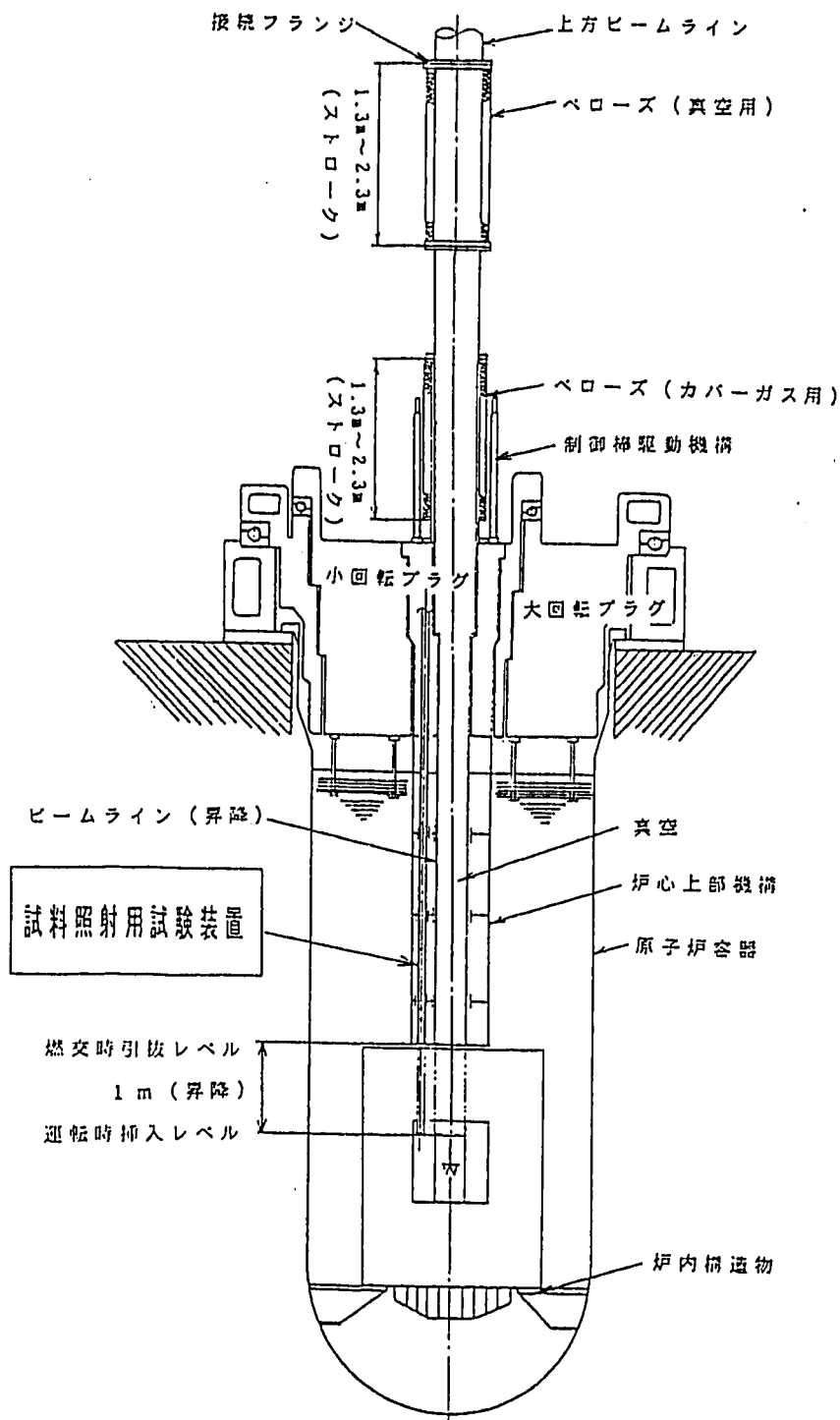


図 4. 6 試料照射用試験装置

5. おわりに

本報告書では、加速器・核分裂炉ハイブリッドシステムを、「常陽」を改造して建設した場合、どのようなイメージのプラントになるか、また許認可項目及びR&D項目としてはどのようなものがあるのかに関して検討を行った。その結果今までは動燃で将来本格的に取り組むとした場合、必ずしも明確であるとは言えなかった加速器・核分裂炉ハイブリッドシステムの具体的な概念を、ある程度ではあるが目に見える形で構築することが出来た。

尚本報告書の検討作業の元になる調査については、三菱重工株式会社横堀 仁氏及び早野睦彦氏に御協力頂いたので、ここで謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) 動燃報告書 PNC ZN9410 94-086 、加速器・核分裂ハイブリッド炉の調査検討、1994年3月、大坪 章 他。
- (2) R. D. F. Cochran, H. I. Israel and D. W. Mueller, "The Radiation and Shielding Design Factors for the Los Alamos Meson Physics Facility," CONF-651109-13 (LA-DC-7522) (1965).
- (3) JAERI-memo 05-191 第2回核変換研究会の概要