

分置

加速器・核分裂ハイブリッド炉調査検討

1994年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒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

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

加速器・核分裂ハイブリッド炉調査検討

大坪 章*、佐久間 実*、
原田 秀郎**

要 旨

加速器と未臨界体系の核分裂炉を組み合わせたハイブリッド炉システムは、極めて安全性に富むシステムとして、諸外国及び日本で研究されている。しかし、工学的には解決すべき課題が数多く存在する。

そこで、本報告書ではまず、このシステムの技術的成立性を可能な限り明らかにする目的で、現在までに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)及び日本原子力研究所(JAERI)で提案されている種々のシステムについて調査検討を行った。

次にこの調査検討の結果、最も技術的成立性の高いと考えられる固体炉心燃料、加速ビーム上方入射、固体ターゲットを用いるシステムに関してシステム概念を構築すると共に、このシステムを実現するために克服すべき技術的課題と必要なR & Dについて検討を行った。また可能な限りこのシステムの経済性及び安全性に関しても検討を行った。

* 大洗工学センター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

Study on the Hybrid System of an Accelerator Driven Fission Reactor

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

ABSTRACT

Some hybrid systems with a subcritical fission reactor driven by an accelerator have been studied in a few foreign countries and Japan. Those concepts make reactor safety seem high, but they have many technological difficulties.

Authors have tried to make sure those difficulties, based on concepts proposed by LANL, BNL and JAERI, in order to clarify the technical feasibility of them as much as possible.

A system using solid core fuel, with accelerated beam injection from its upper side and a solid target, was considered to have the highest technical feasibility among them. Authors have proposed a conceptual design of such system, and performed a study on technical problems to be solved and on R&D's required in order to realize it. The economy and the safety were also studied on it as far as possible.

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

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

目 次

1. はじめに	1
2. 研究現状の調査	2
2.1 調査文献の概要	2
2.2 特徴比較	4
3. 検 討	25
3.1 概 要	25
3.2 課題の整理	25
3.2.1 加速器本体	25
3.2.2 ハイブリッド利用	27
3.2.3 原子炉（未臨界炉）	28
3.3 システム概念の提案	30
3.4 必要なR&D	34
4. 考 察	42
5. おわりに	44

表リスト

表2.1	加速器・核分裂ハイブリッド炉の特徴比較表	6
表2.2	加速器・核分裂ハイブリッド炉（原研）の基本仕様	8
表2.3	加速器・核分裂ハイブリッド炉（BNL 小電流オプション）の特性	9
表3.1	各種未臨界炉システム構成の概念比較	36
表3.2	加速器・核分裂ハイブリッド炉の主要目例	37
表3.3	課題と解決策	39

図リスト

図2.1	加速器・未臨界ハイブリッド炉（金属燃料、ナトリウム冷却）	10
図2.2	加速器・未臨界ハイブリッド炉（液体ターゲットの例）	11
図2.3	炉心部のエネルギースペクトルの比較（LMFBR, BP-ABMR, PB-ABNR）	12
図2.4	多段サイクロトロン概念構成	13
図2.5	Vターゲットの設計例（BNL-JRC）	14
図2.6	消滅炉- 金属燃料ナトリウム冷却炉概念（原研）	15
図2.7	消滅炉- 熔融塩炉概念（原研）	16
図2.8	消滅炉- フェニックス炉概念（BNL）	17
図2.9	消滅炉- 高熱中性子炉概念（LASL, LANL）	18
図2.10	消滅炉- 高熱中性子炉概念（BNL）	19
図2.11	加速器・核分裂ハイブリッド炉概念（LANL、全体構成）	20
図2.12	加速器・核分裂ハイブリッド炉概念（LANL、炉心部詳細）	21
図2.13	加速器・核分裂ハイブリッド炉概念（LANL、系統概念）	22
図2.14	加速器・核分裂ハイブリッド炉概念（BNL、大電流ワシオン）	23
図2.15	加速器・核分裂ハイブリッド炉概念（ITEP）	24
図3.1	大電流加速器の基本構成	40
図3.2	加速器・核分裂ハイブリッド炉のシステム概念	41

1. はじめに

加速器と核分裂炉を組み合わせたハイブリッド炉システムは、加速器によって高速に加速された荷電粒子を何らかのターゲットに衝突させて中性子を発生させた後、更にこの発生した中性子を未臨界体系の核分裂炉に導いて核分裂によるエネルギーを発生させるというものである。このシステムの基本原理より、本システムでは加速器が止まれば必然的に核分裂炉も炉停止することになり、従って極めて安全性に富むシステムであるとして、諸外国及び我が国において研究されている。しかし、今まで互いに関係のない別々のシステムとして研究されてきた、加速器と核分裂炉を組み合わせるという革新的な考え方に基づいたシステムであるため、このシステムの技術的成立性等には疑問が多く存在する。本報告書はこのような疑問点を可能な限り明らかにする目的で、このハイブリッド炉システムの調査検討を行ったものである。

本調査検討では、ハイブリッド炉システム研究に関する最近の主要な文献を調査し、この調査した結果に基づいて最も技術的成立性の高いと考えられるハイブリッド炉システム概念を提案し、更にその技術的課題を克服する為に必要なR & Dにつき検討した。また、可能な限り経済性（入出力エネルギーバランス並びにMA (minor actinide) ・FPの消滅量・消滅率）及び安全性（未臨界度、安全系及び反応度制御系）に関しても検討を行った。

2. 研究現状の調査

2.1 調査文献の概要

ハイブリッド炉研究に関する最近の主要な文献^{(1) - (6)}を調査し、その結果を纏めた。各論文に紹介されている内容の要旨を以下に示す。

(1) "The use of minor actinides and a small power proton accelerator for fast reactor with a high breeding gain" (1992. March), H. Takahashi.

○少し未臨界な体系を持つ核分裂炉を加速器で駆動して、MA (minor actinide) を消滅させることを本論文では提案している。

燃料としてMAを利用することによって、燃焼度の増加と炉内出力分布の平坦化が達成出来る。

○スプレッション反応 (sp) や、高エネルギー核分裂反応 (HF) による外部中性子を用いた核分裂炉の駆動は、核分裂炉に存在する正の反応度添加の問題 (ポイド係数、燃料のポインティング) を緩和することが出来る。

○金属燃料は他の燃料形態よりも出力反応度欠損 (PRD) や燃焼反応度欠損 (BRD) が小さい。

MOX燃料の場合でもMA (^{237}Np) を混入させることにより、反応度を小さくすることが出来る。これらの炉は反応度欠損が小さいため、 $k=0.99$ の体系で15MW (15mA, 1GeV) の陽子ビームを入射して駆動することができる。

○単に、 ^{237}Np の消滅でなく、炉特性改善にこれを活用することも出来る。

○要求電流値が小さい (15mA) ので加速器としてサイクロトンの利用も考えられる。

○大電流リニアックは、複数個の消滅炉の駆動源として利用できる。

(紹介されている例)

○金属燃料ナトリウム冷却 (図2.1)

○金属燃料Pb-Bi ターゲット (図2.2)

(2) "The Energy Requirement for Transmuting Fission Products," H. Takahashi and H. Rief.

○本論文ではスプレッション中性子でMA, FP を核変換することを提案している。

- エネルギー必要量は未臨界増倍体系を用いることで楽になる。
 - ターゲットの状況に応じて、エネルギー必要量と実効増倍率 (k_{eff}) との関係を導いている。
 - 本論文は一般的な事項を想定しており、特別プラントの紹介はない。
- (3) "THE ROLE OF ACCELERATOR IN THE NUCLEAR FUEL CYCLE"(1990), H. Takahashi.
- 1~3GeVの陽子加速器を用いて核燃料サイクルを新たに構築できる可能性がある。450MWの加速器で年間1.5 ~2.5トンの核分裂性物質が生産出来る。
 - 未臨界体系を加速器で駆動することにより、安全上の問題を楽に出来る。
 - 使用済燃料の永久貯蔵 (ユッカカウテン) の代案として核変換を検討した。
 - 15~30MWの陽子ビームで1GWeLWR10基分のMAを消滅でき、900Mwt (270 ~240MWe) のプルトニウムと100kgの核燃料生産が可能である。
 - ^{137}Cs ($T_{1/2}=30\text{yr}$) を3年の実効的半減期で消滅させるには、 $10^{17}\text{n/cm}^2/\text{s}$ の熱中性子束が必要となる。これは、スプレッション中性子をもってしても達成困難である。
 - dと軽核との散乱によるミュー-2次粒子の運動量発散を抑えることができるなら、ミューオン触媒核融合中性子 (14MeV) を高フラックス ($10^{16}\text{n/cm}^2/\text{s}$) にでき、(n, 2n), (n, 3n)反応で ^{137}Cs を消滅させることが可能となる。
- (4) "Concepts of Accelerator Based Transmutation Systems"(1992), H. Takahashi.
- 放射性廃棄物処理・処分の問題は経済的要因のほかに長期の放射線障害の評価が関係してくるので複雑である。
 - スプレッション中性子で消滅 (MA, FP) させる。
 - 高速未臨界体系を加速器で駆動する。
 - a. MAインベントリ大 (k_{eff} が大)、小電流の場合は、マイクロトロンも利用可能となる。
 - b. MAインベントリ小 (k_{eff} が小)、大電流の場合は、リアックを用いる必要がある。

尚、後に図2.11、図2.12、図2.13で説明する米国ロスアラモス研究所の情報は、下記の会議でOHP原稿を発表者から直接手に入れたものである。

Specialist's Meeting on Accelerator Based Transmutation, 24-26 March 1992 at Paul Scherrer Institute Villigen, Switzerland.

発表者名と題名は次の通りである。

J. R. Ireland, "Overview of Los Alamos Concepts for Accelerator Transmutation of Nuclear Waste (ATW)."

2.2 特徴比較

参考文献(1)～(5)を含むハイブリッド炉研究に関する最近の主要な文献及び国際会議での発表につき調査を行った。これまで、加速器と核分裂炉のハイブリッド利用について提案の主なものは下記の4機関から発表されている。

日本原子力研究所 (JAERI)

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)

各機関からの提案は、必ずしも1つに絞られたものではなく、複数個の提案が行われている。ここでは各機関の代表的(特徴的)提案を中心として整理し、表2.1に比較表として纏めた。以下に比較表の特徴を整理する。

① JAERI

高速中性子の核反応により、MAの核変換を行う。

1000MWeLWR10基分のMAの処理を目的とする。

60MWのビームパワーで達成可能である。

LMFBRの技術と金属燃料技術を使用する。

(表2.2に詳細を示す。)

② LANL

高フラックス熱中性子の核反応により、MA、FPの核変換を行う。

D₂O減速材中にCANDUタイプの圧力管を配置し、液体(スラリー)MA、FPを燃料兼冷却材として循環させる。

高速処理、連続処理が可能である。

CANDU技術を応用するとしているが、溶液系の化学処理にR&D要素が大である。

(図2.11～図2.13参照)

③ BNL (大電流オプション)

高速中性子の核反応により、MAの核変換を行う。

1000MWeLWR75基分のMAの処理を行う。

ビームは104mAである。

酸化物燃料を使用する。

FFTFの技術を応用する。

大電流オプションは図2.8に示したものである。又、図2.14にはこのシステムの使用済燃料処理政策上の位置付けと、本システムに使用する燃料を示す。

④ BNL (小電流オプション)

高速中性子の核反応により、MAの核変換を行う。

1000MWeLWR10基分のMAの処理を行う。

ビームは15mAとし、多段サイクロトロン の利用も考え得るものとする。

酸化物燃料を使用する。

V型ターゲット 形状を使用する。

小電流オプションは図2.10に示したものである。又表2.3には本システムの特性を示す。

⑤ I T E P

理論的な検討などが活発であるがプラントの提案ははっきりしない。

L A N L (USA) の提案の後追いの様であり、目立った特徴が見あたらない。

(図2.15参照)

表 2.1 加速器・核分裂ハイブリッド炉の特徴比較表

Comparison among Accelerator-Driven Converters

	J A E R I	L A N L	B N L	B N L'	I T E P
◎ プロジェクト名称	OMEGA ETA	ATW	PHOENIX	Low current Option	Accelerator Complex
◎ 加速器					
○ 加速エネルギー (MeV)	1.5	1.6	1.6	2-3	1.6
○ 加速電流 (mA)	39	250 (4*62.5)	104	15	300
○ ビームパワー (MW)	59	400	167	30-45	480
○ 加速粒子	p	p	p	p	p
○ 加速器種類	Linac	Linac	Linac	Cyclotron (Multistage)	Linac
◎ ビーム窓					
○ 材質	ODS	Inc718	?		
○ 冷却	Sodium	D ₂ O	Sodium		
○ 寿命	1y	1/2y			
◎ ターゲット					
○ ターゲット材質	W	W+Pb/Pure Lead	?		Pb-Bi
○ ターゲット状態	Solid	Solid/Liquid			Liquid
○ ターゲット熱出力 (MW)	?	4*75/			96
○ 冷却	Sodium	D ₂ O/Nak (2nd)			
◎ フランケット (炉心)					
○ フランケット材質	MA-Zr alloy	Actinide Slurry	MAOX	MAOX	
○ フランケット状態	Bundle Pin	In Pressure Tube (Zr)	Bundle Pin	Bundle Pin	
○ フランケット熱出力 (MWt)	820	4*1542	8*450	900	
○ Keff	0.89	0.93-0.95	0.9	0.9-0.95	

表 2.1 加速器・核分裂ハイブリッド炉の特徴比較表 (続)
 Comparison among Accelerator-Driven Converters (Continued)

	J A E R I	L A N L	B N L	B N L'	I T E P
◎ 減速材					
○ 材質	None	D ₂ O	None	None	D ₂ O
◎ 冷却系					
○ 冷却材	Sodium	Ac. Slurry (13.1MPa)	Sodium	Sodium/Helium	
○ 温度 (入・出)	330-480	273-325			
◎ プラント特性					
○ 消滅 (MA) etc.	250kg/y (8%)	2500kg/y, 250kg/y (99Tc, 129I)	2600kg/y 580kg (I)	10LWR	500kg/y
○ 生成	None		1550kg/y (Pu)	100kg/yr (fissile)	
○ 発電 (MWe)	250	4*487	1260	230-260	
◎ その他					
○ 主な出典	Global'93 熔融塩も提案	LA-UR-92-46 PSI1992.3 High Thermal Neutron Flux CANDU	Nuclear Tech.101(1993) PSI1992.3 FFTF None Funneling		PSI1992.3

表 2. 2 加速器・核分裂ハイブリッド炉（原研）の基本仕様⁽⁶⁾
Basic Features of the JAERI Accelerator-Driven Converter

Operating Conditions of the Accelerator-Driven
Transmutation Solid Target/Core System

Proton beam energy	1.5 GeV
Proton beam current	39 mA
Actinide inventory	3160 kg
k_{eff}	0.89
No. of neutrons	40 n/p
No. of fission (>15MeV)	0.45 f/p
(<15MeV)	100 f/p
Neutron flux:	4×10^{15} n/cm ² s
Mean neutron energy	690 keV
Burnup	250 kg/y(8%/y)
Thermal output	820 MW
Power density (max)	930 MW/cm ³
(ave)	400 MW/cm ³
Maximum temperature	
Output	473 °C
Fuel	890 °C
Clad	528 °C
Electric output	246 MW

Solid and Molten-Salt System Designs Comparison

	Solid system	Molten-salt system
Fuel	Metal alloy Np-15Pu-30Zr AmCm-35Pu-10Y	Chloride salt 64NaCl-5PuCl ₃ -31MgCl ₂ (MA:Np,Am,Cm)
Target	Solid tungsten	Chloride salt
Primary coolant	Liquid sodium	Chloride salt
Actinide inventory	3160 kg	5430 kg
k_{eff}	0.89	0.92
Spallation neutrons	40 n/p	38 n/p
Proton beam	1.5 GeV - 39 mA	1.5 GeV - 25 mA

表 2. 3 加速器・核分裂ハイブリッド炉 (BNL小電流オプション) の特性⁽⁴⁾

Characteristics of the BNL Accelerator
Driven Converter (Small Current Option)

Coolant	k_{eff}	Proton Beam Power [MW]	Beam Current [mA]			Reactor Power [MW _e]	²³³ U Production [kg]
			1 GeV	2 GeV	3 GeV		
Na	.90	27.9	27.9	14.0	9.3	900	85
He	.95	13.0	13.0	6.5	4.3	900	103

Table II: Characteristics of an accelerator-driven helium cooled sub-critical fast assembly transmuting the yearly actinides of 10 LWRs (1 GW_e)

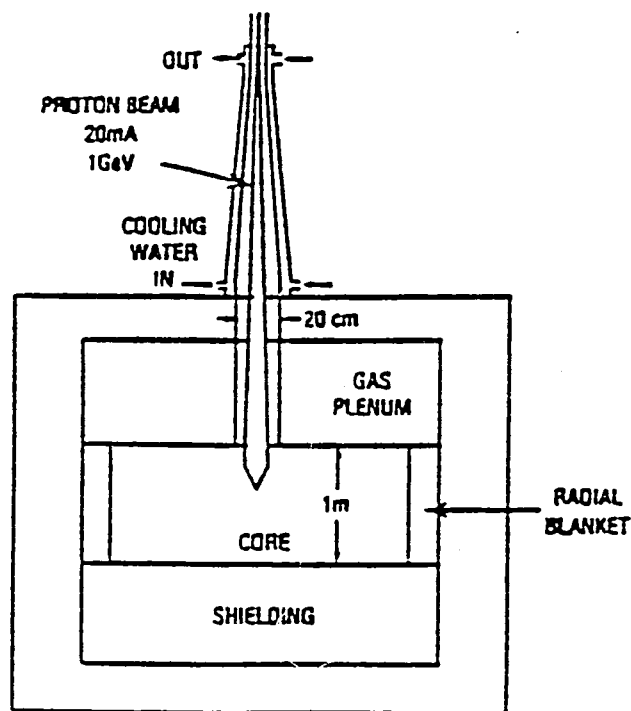


Fig.2 Overview of a fast breeder (or Incinerator) assisted by proton accelerator.

図 2.1 加速器・未臨界ハイブリッド炉⁽¹⁾

(金属燃料、ナトリウム冷却)

An Accelerator-Driven Converter

(Metal Fuel, Sodium Cooling)

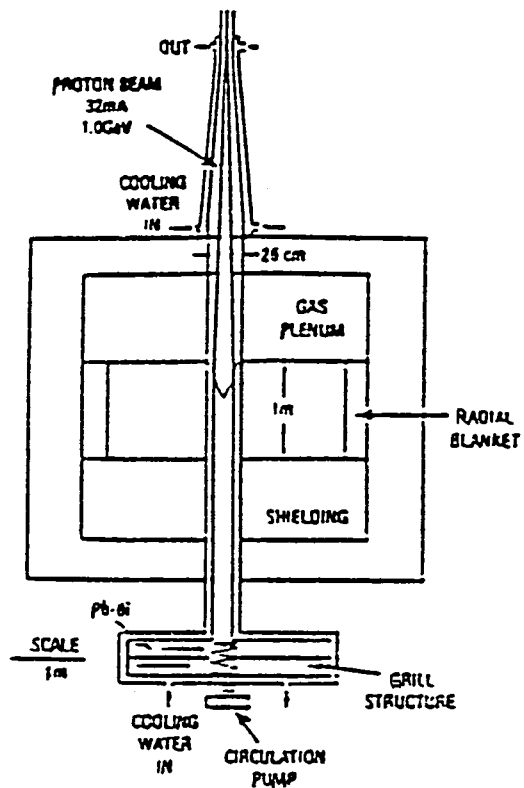


Fig.3 An Overhead view of the flowing Pb-Bi Eutectic Target for fast breeder (or Incinerator) assisted by proton accelerator.

図 2. 2 加速器・未臨界ハイブリッド炉⁽¹⁾

(液体ターゲットの例)

An Accelerator-Driven Converter

(Liquid Target)

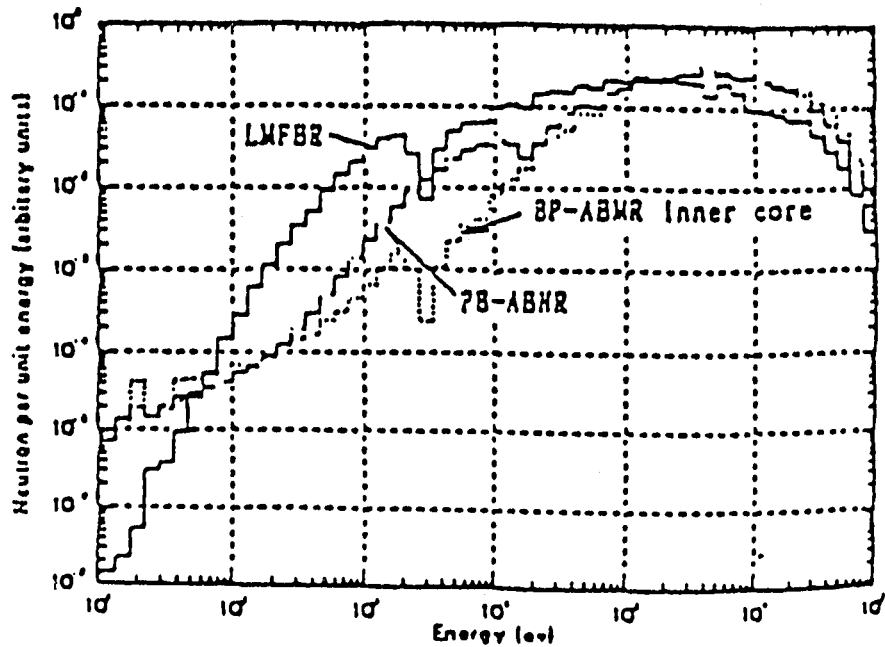


Fig. 6 Comparison of core-averaged neutron spectra in Mox fuel LMFBR, inner core of BP-ABMR, and PB-ABNR.

図 2.3 炉心部のエネルギースペクトルの比較⁽³⁾
(LMFBR, BP-ABMR, PB-ABNR)

Comparison of Core-Averaged Neutron Spectra

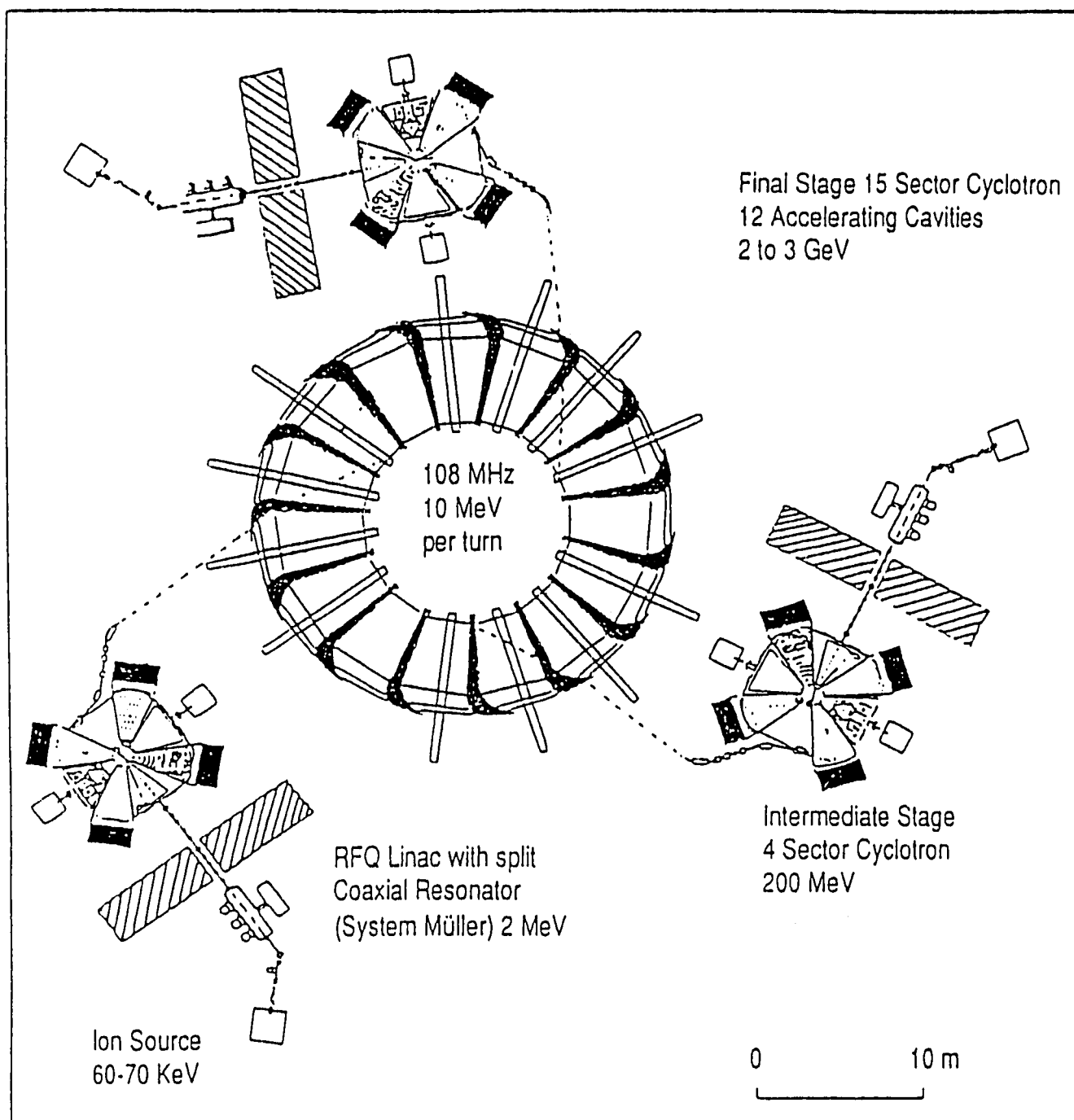


Figure 3: A schematic Multistage Cyclotron Arrangement

図 2. 4 多段サイクロトロン の 概 念 構 成 ⁽⁴⁾

A Schematic Multistage Cyclotron Arrangement

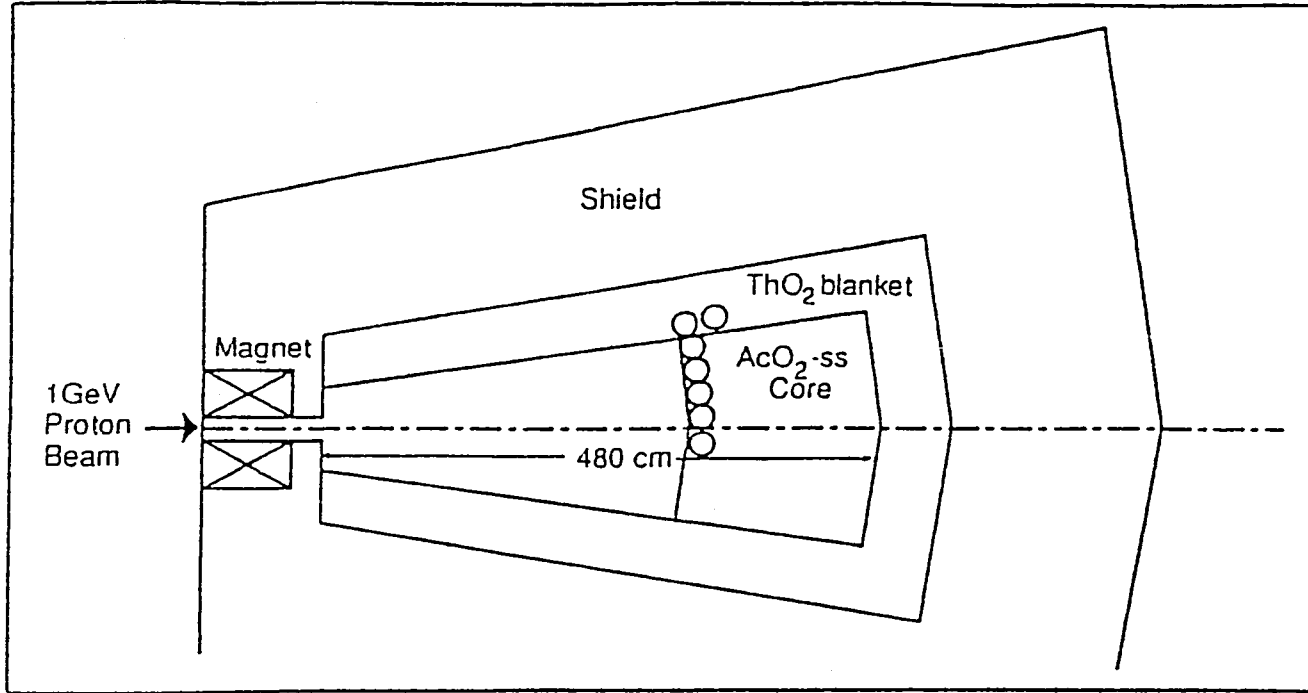


Figure 6: Schematic sub-critical target design

図 2. 5 V ターゲットの設計例 (BNL-JRC) ⁽⁴⁾

Subcritical V Type Target Design

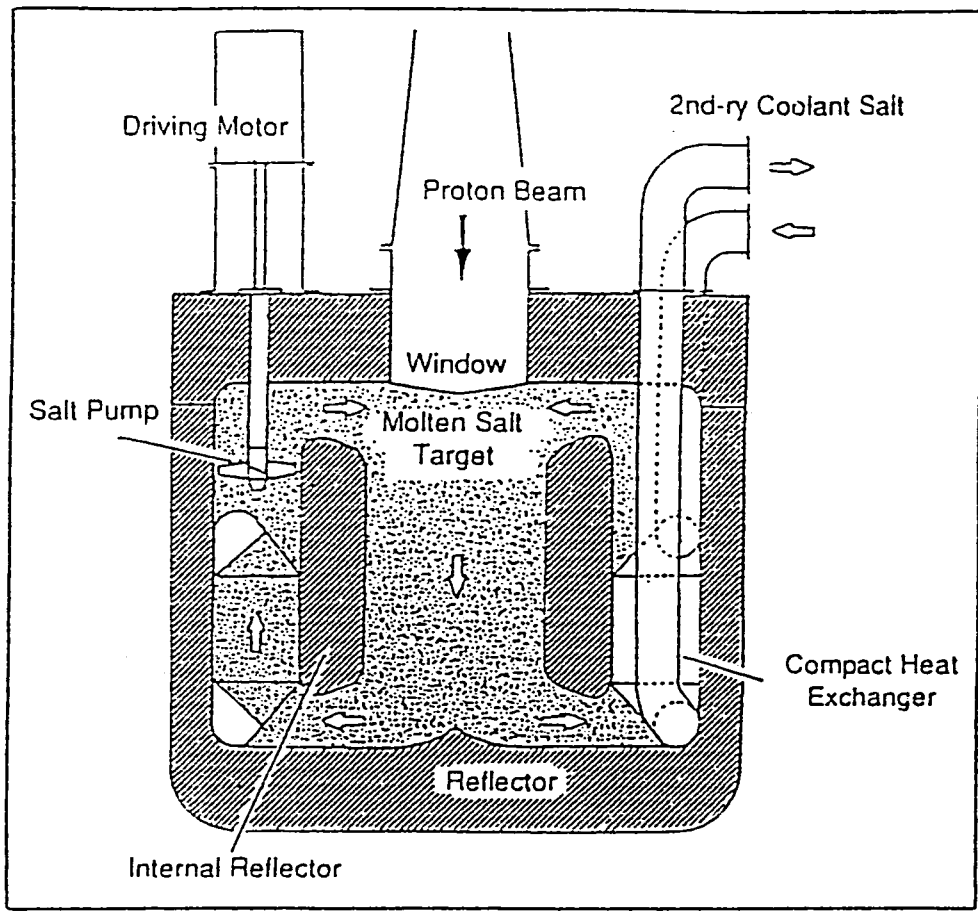


図 2. 6 消滅炉－金属燃料ナトリウム冷却炉の概念（原研）⁽⁴⁾

The JAERI Molten Salt Reactor Concept

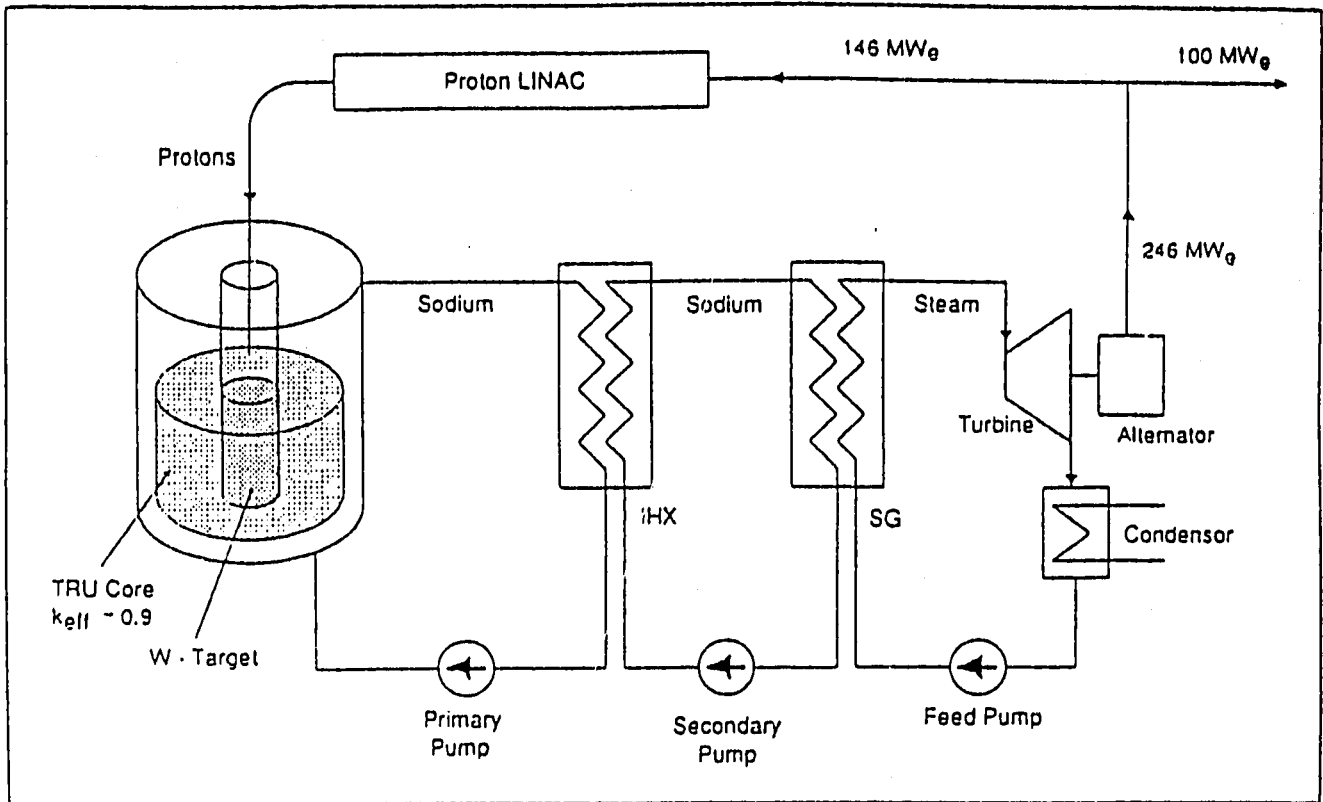


Figure 7: Conceptual flow diagram of JEARI's actinide transmutation plant

The reference parameters for this system are:

Proton Beam Current	39 mA	Coolant	Sodium
k_{eff}	0.89	Power Density max.	930 MW·m ⁻³
Actinide Loading	3160 kg	ave.	400 MW·m ⁻³
Burn-up	250 kg·y ⁻¹	Temperatures:	
Thermal output	820 MW	Coolant outlet	473 C
Neutron Flux	4.10 ¹⁵ n·cm ⁻² ·s ⁻¹	Fuel	890 °C
Mean Neutron Energy	690 keV	Clad	528 °C

図 2.7 消滅炉 - 熔融塩炉の概念 (原研) (4)

Conceptual Flow Diagram of JAERI's
Actinide Transmutation Plant

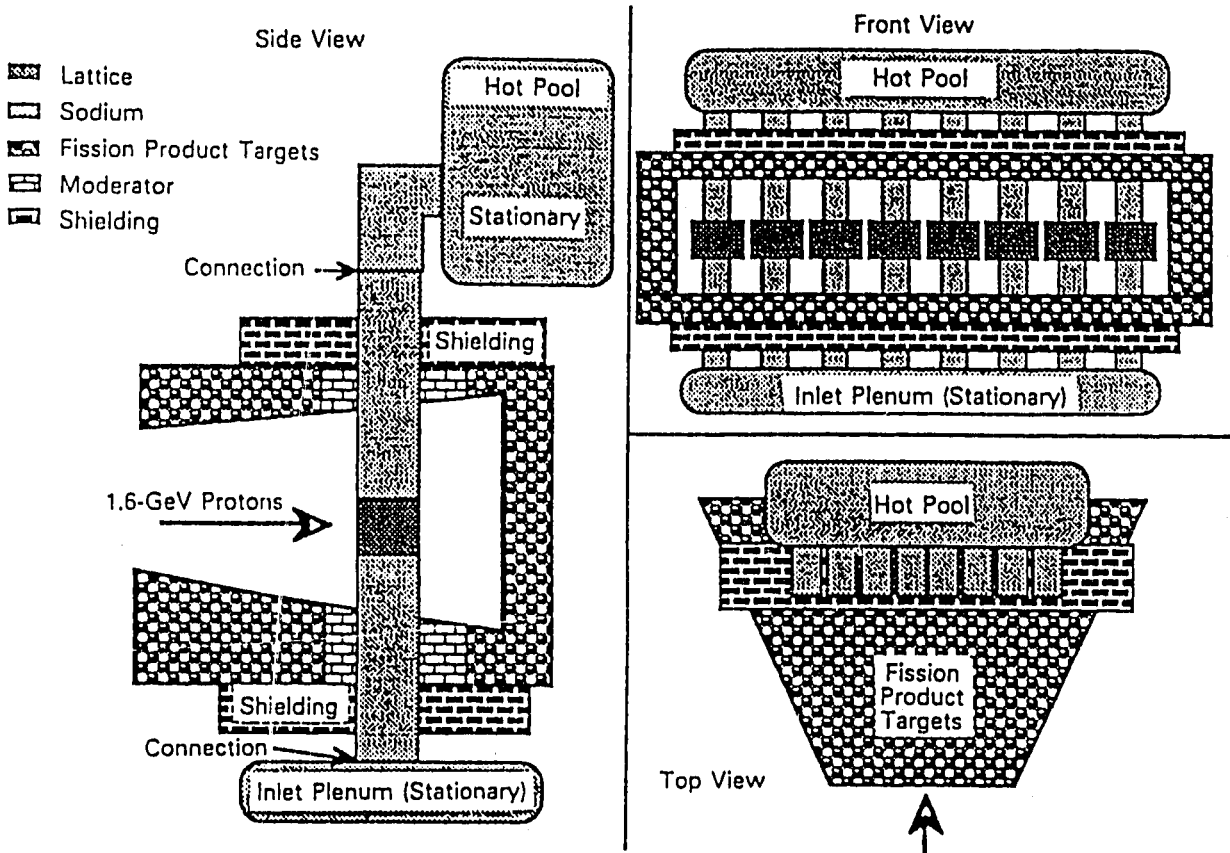
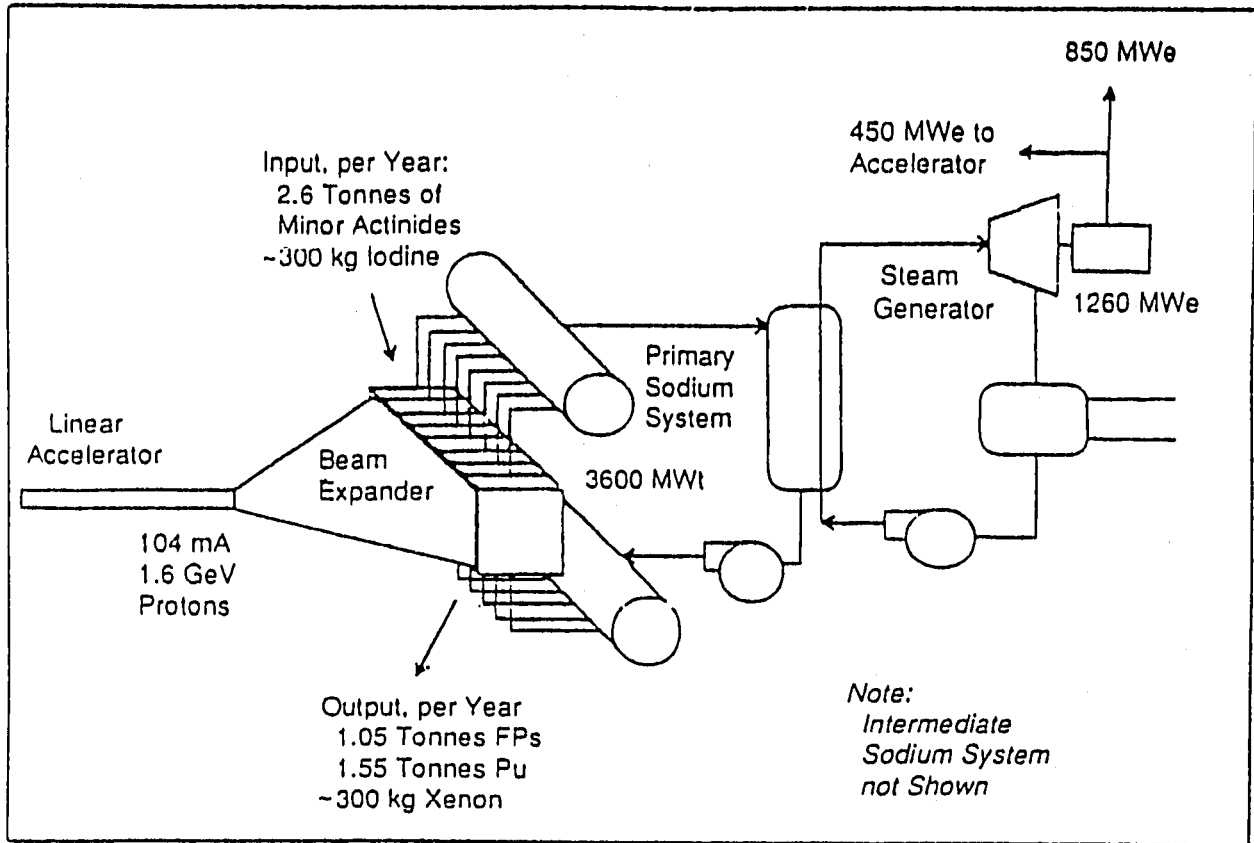


Fig. 15. PHOENIX target chamber from three perspectives.

図 2. 8 消滅炉—フェニックス炉の概念 (BNL) (5)

The PHOENIX Concept

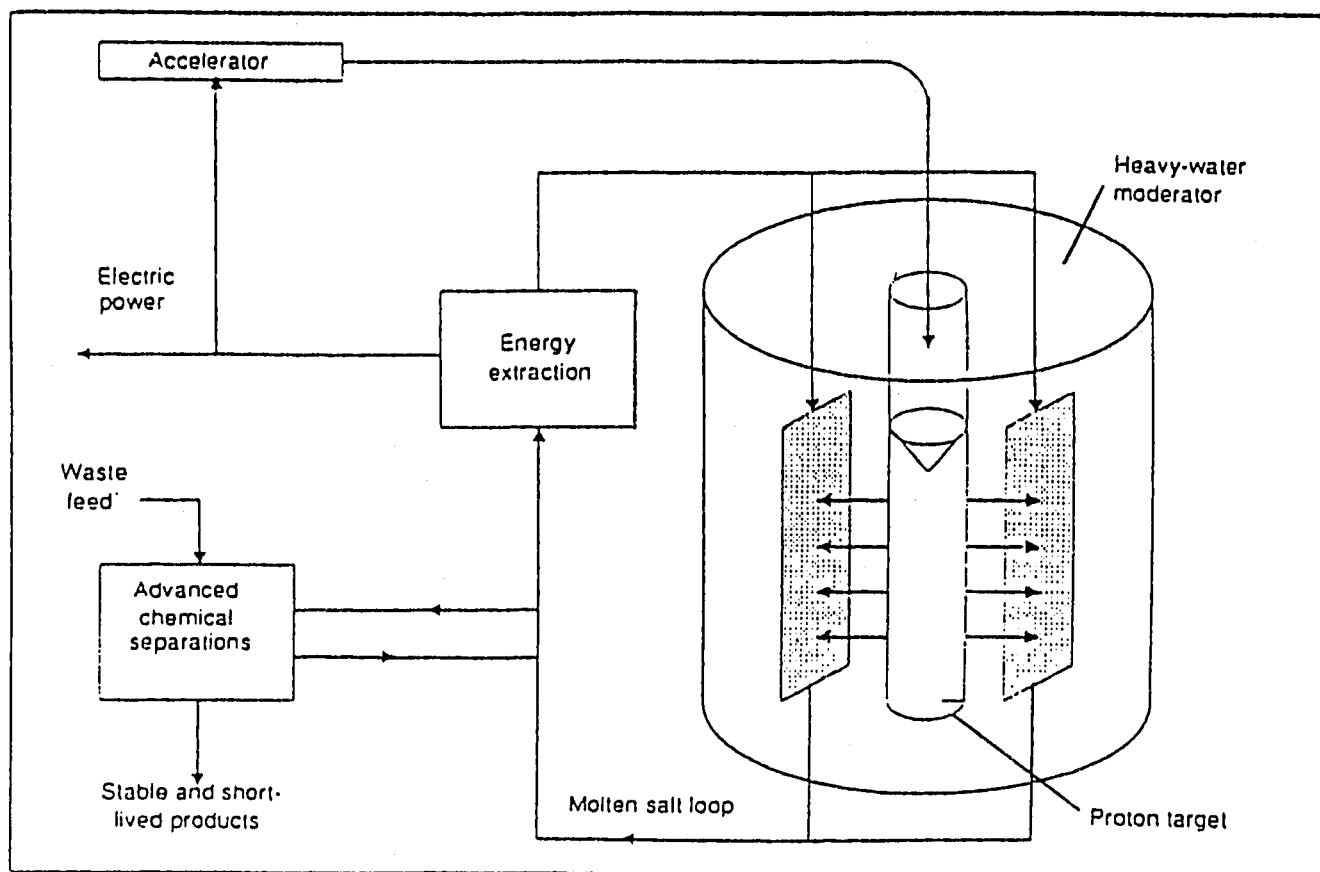


Figure 11: Schematic flow scheme of the LASL accelerator-driven nuclear waste converter.

図 2.9 消滅炉—高熱中性子炉の概念 (LASL, LANL) ⁽⁴⁾

Schematic Flow of the LASL Accelerator-Driven Nuclear Waste Converter

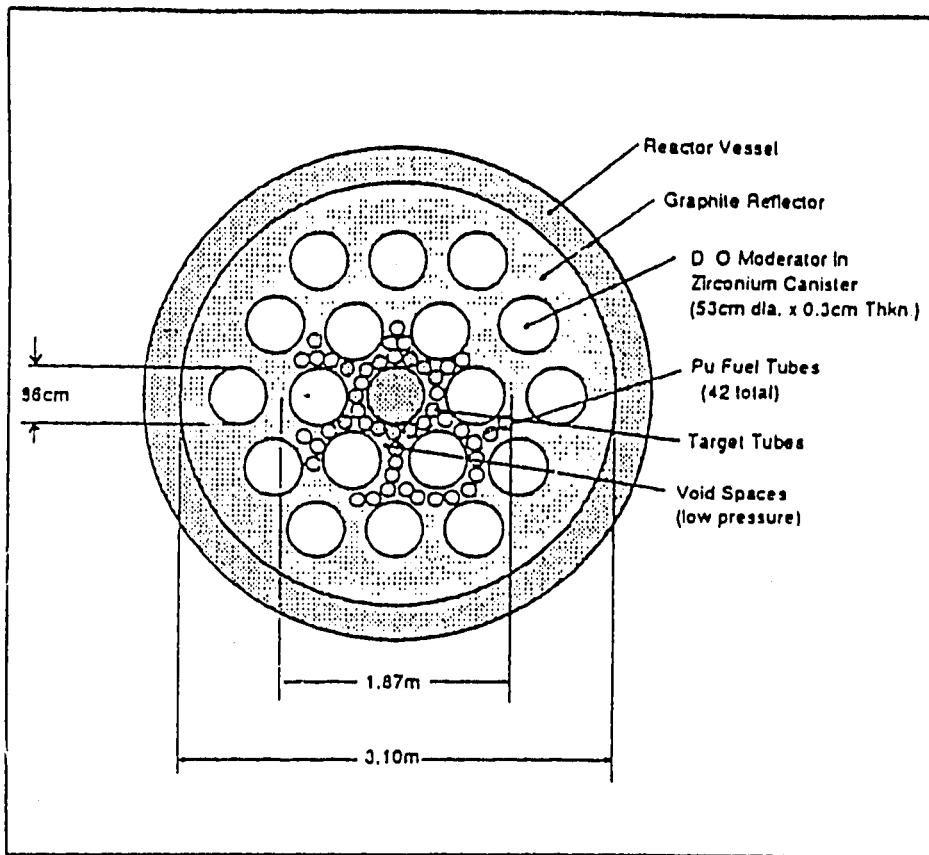


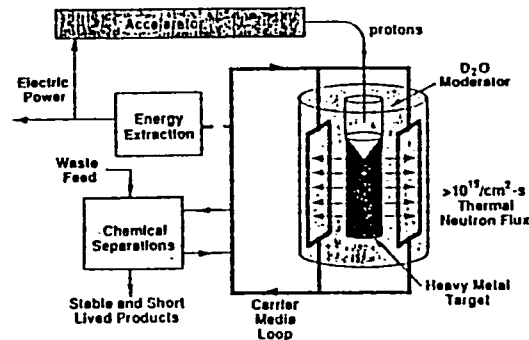
Figure 12: The BNL High-Flux Particle-Bed Reactor System

図 2.10 消滅炉 - 高熱中性子炉の概念 (BNL) (4)

The BNL High-Flux Particle-Bed Reactor System

General Features

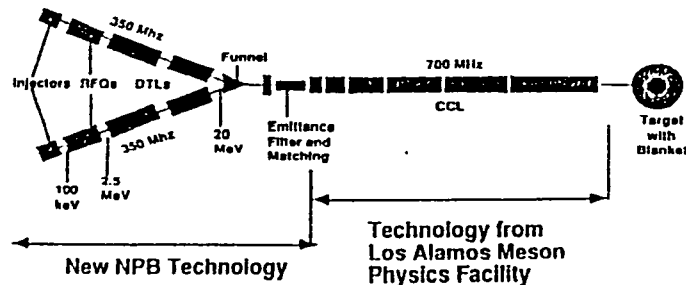
- Accelerator driven
- Central, intense neutron source
- High fluxes of thermal neutrons
- Dilute, low material inventories
- Continuous material feed
- Advanced separations chemistry



Accelerator

(Los Alamos Report LA-UR-91-2797)

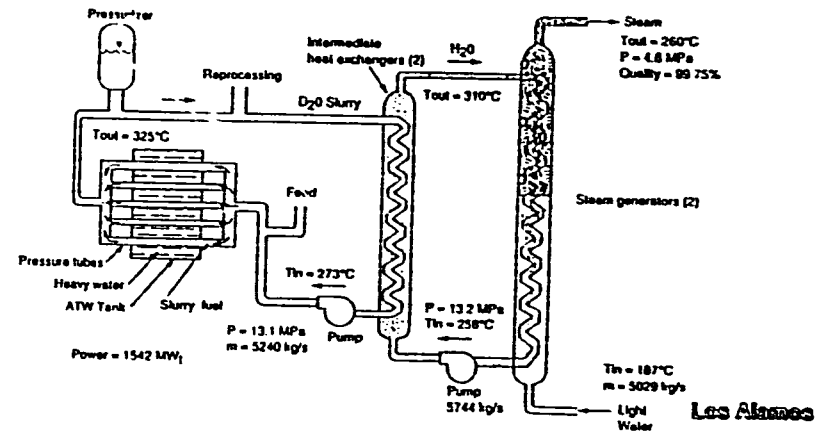
- 1600 MeV 250 mA system would drive 4 target/blanket modules
- Accelerator design incorporates recent major technology advances
- Design reviewed by DOE Energy Research Advisory Board: "The continuous wave RF linac approach is technically sound" (Ref: DOE/S-0074 (Feb. 1990))



Blanket System

(Los Alamos Report LA-UR-92-46)

- CANDU-like technology forms reference nuclear system design basis
- 250 pressurized assemblies
- 325 kg actinide, 100 kg technetium, iodine per target/blanket
- Transmutation rate/yr: 625 kg actinides, 75 kg FP



Transmutes Pu, Higher Actinide, Tc, Discharge from 7.5 LWRs
4 Aqueous Blankets (1540 MW ea)

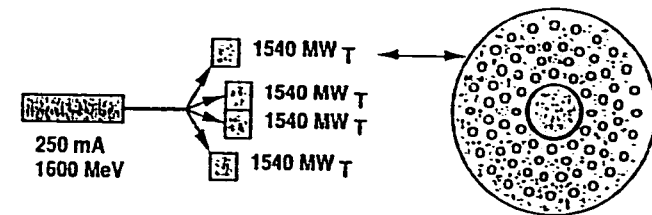
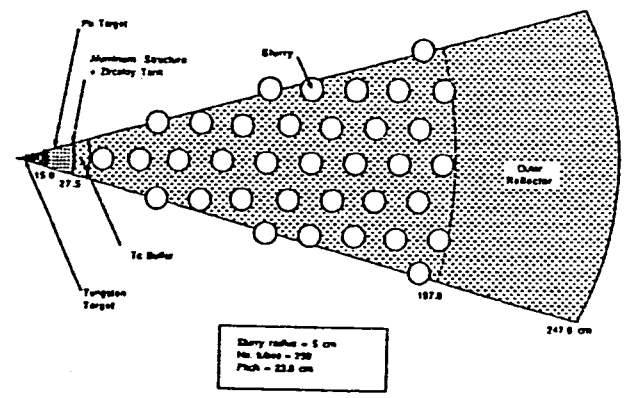


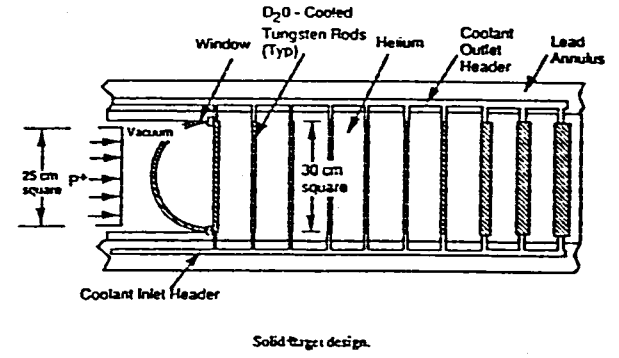
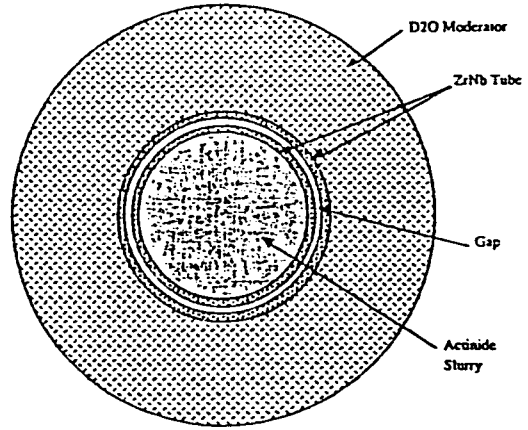
図 2.11 加速器・核分裂ハイブリッド炉の概念 (LANL、全体構成)

The LANL Accelerator-Driven Converter (Whole Structure)

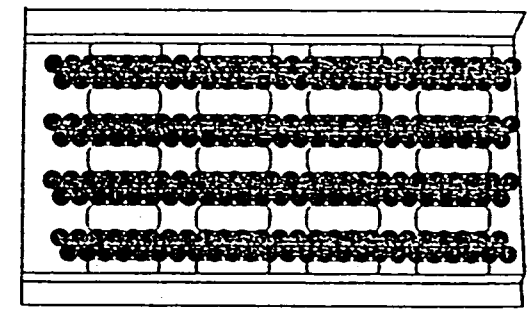
LANL



Slurry radius = 5 cm
No. Slows = 750
Pitch = 23.8 cm



Solid target design.

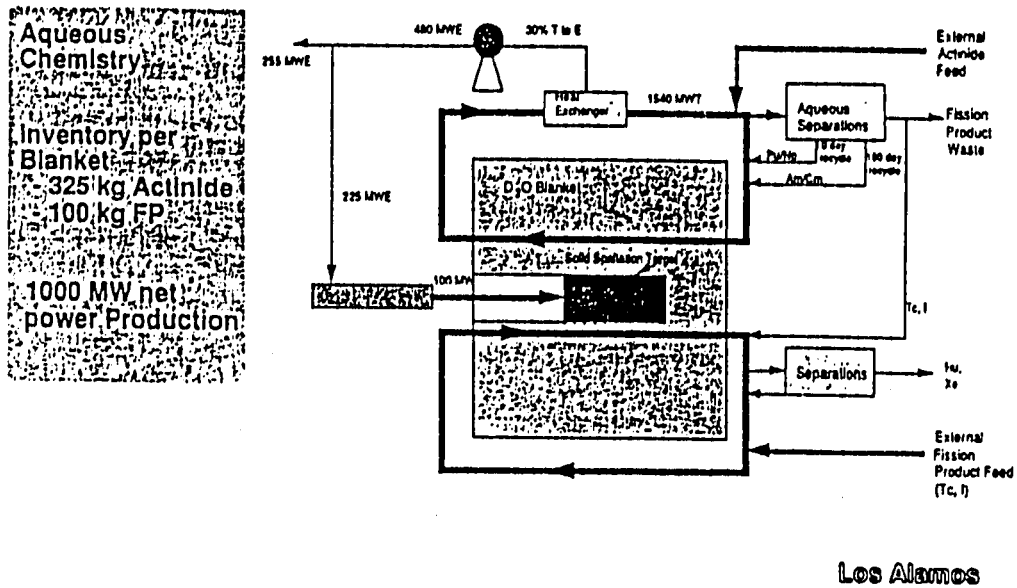


Region	Radius (cm)	Thickness (cm)	Volume Fraction
Slurry	5.0		0.160
Inner Tube	5.42	0.42	0.028
Gap	5.81	0.39	0.028
Outer Tube	6.23	0.42	0.032
Moderator	12.52	6.29	0.752

Pitch = 23.8 cm (9.4 in.)

図 2.12 加速器・核分裂ハイブリッド炉の概念 (LANL、炉心部詳細)
The LANL Accerelator-Driven Converter (Core)

Base Case (Target/Blanket Module)



Actinide Flowsheet Uses Proven Aqueous Processes (Los Alamos Report LA-UR-92-63)

- Fast recycle of Pu/Np to minimize processing inventories
- Aqueous solvent extraction and ion exchange technologies
- $> 10^5$ separation factors
- Liquid discharge $<$ TRU levels
- Waste volumes and recycle options under investigation

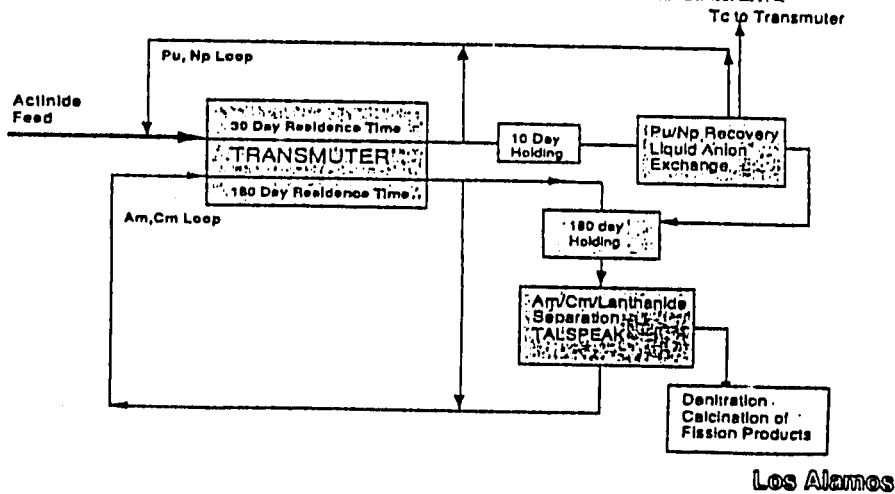


図 2.13 加速器・核分裂ハイブリッド炉の概念 (LANL、系統概念)
The LANL Accelerator-Driven Converter (System)

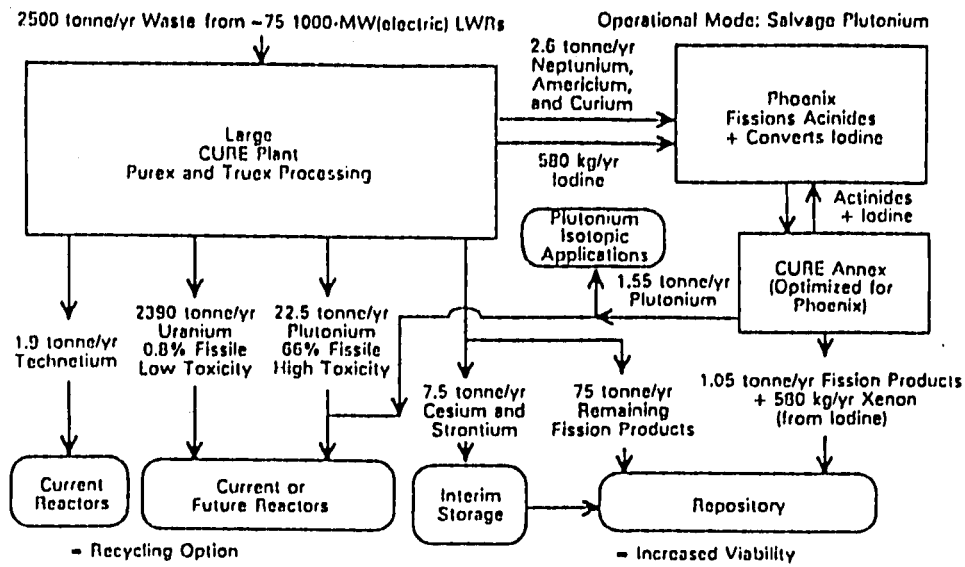


Fig. 11. PHOENIX transmutes the wastes that cannot go into thermal reactors.

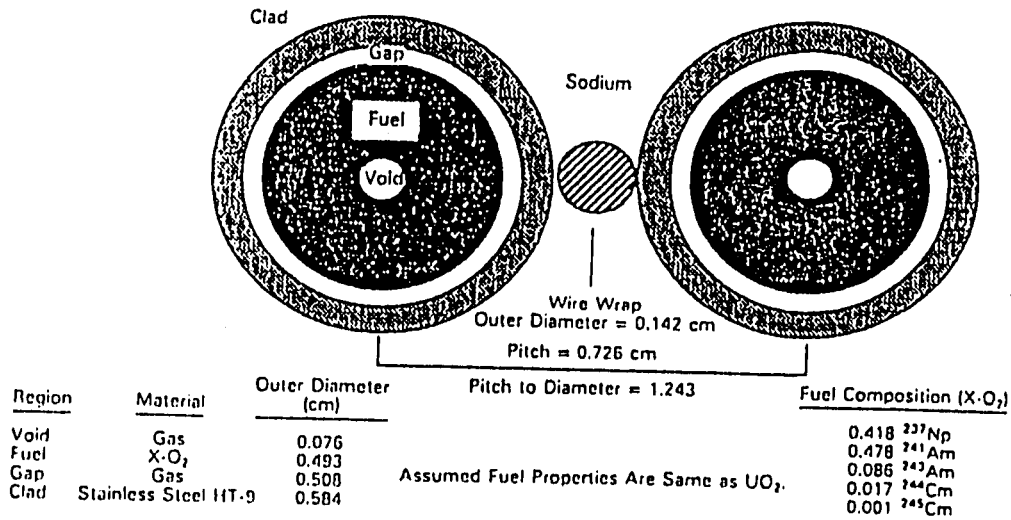


Fig. 10 PHOENIX lattice fuel pins are currently based on FFTF oxide fuel.

図 2.14 加速器・核分裂ハイブリッド炉の概念⁽⁵⁾
(BNL、大電流オプション)

The BNL Accerelator-Driven Converter
(Large Current Option)

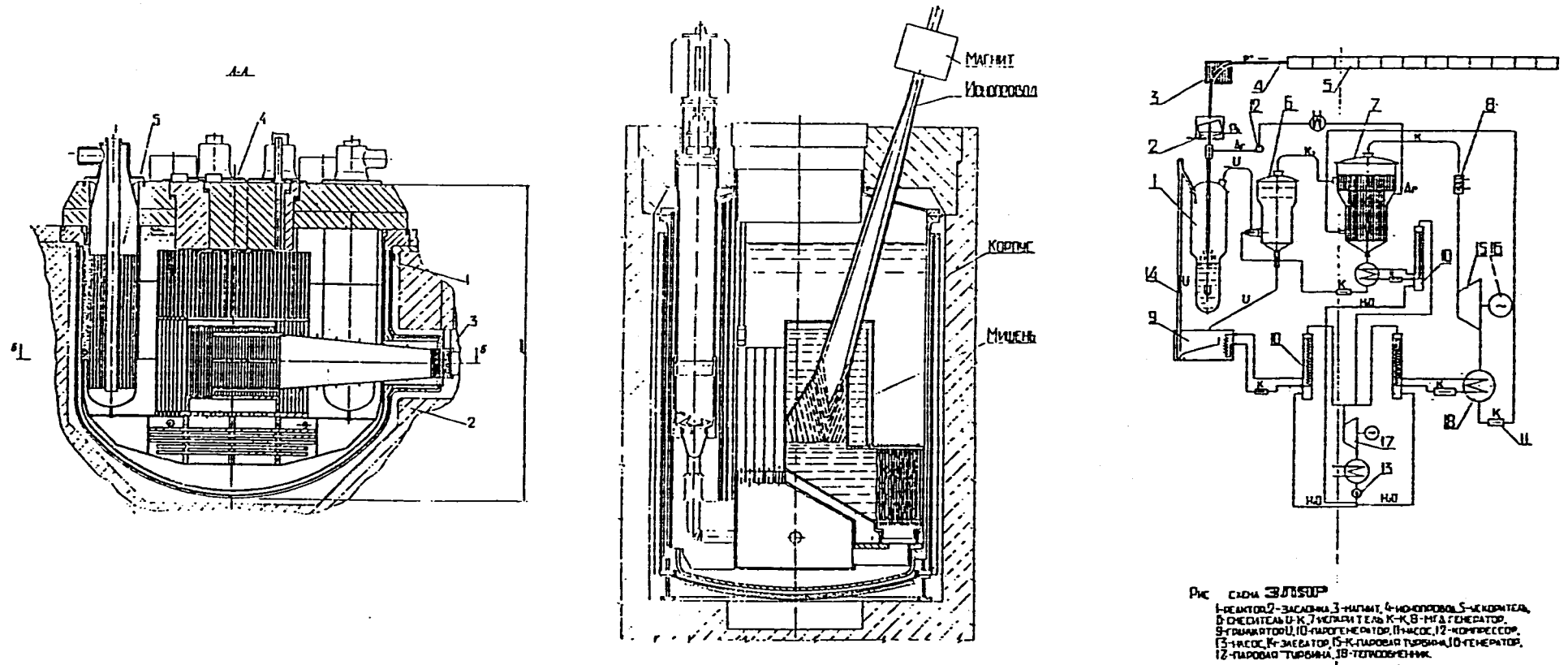


図 2.15 加速器・核分裂ハイブリッド炉の概念 (ITEP)

The ITEP Accerelator-Driven Converter

3. 検 討

3.1 概 要

加速器・核分裂ハイブリッド炉については、調査結果に纏めたように国内外の各機関から各種の概念が提案されており、そのフェジリティについて試作試験や、実験を含む各種の検討及び問題点の指摘が行われている。しかしながら、これを工学的に利用しようとする場合には、稼働率や経済性等に絡む技術的課題を克服する必要がある。

これらの課題は、加速器本体に関するもの、加速器と未臨界炉とのハイブリッド利用に関するもの、ならびに未臨界炉に関するものに分けられるので、以下にそれぞれについて課題を整理し、3.2節に記載した。

加速器・核分裂ハイブリッド炉の利用に関しては、未臨界炉のシステム構成についてターゲットと燃料の選択に関し、いくつかの選択が考えられる。そこで、システム構成に関する検討を行って対象となる概念をある程度絞り込んだ。これについて、3.3節に記載した。

3.2 課題の整理

3.2.1 加速器本体

加速器・核分裂ハイブリッド炉の概念は大別すると次の2つになる。

- ・大電流加速器と深い未臨界体系 ($k_{eff} < 0.9$) との組み合わせ
- ・小電流加速器と浅い未臨界体系 ($k_{eff} \sim 1.0$) との組み合わせ

加速器側からみると大電流加速器に課題が多いため、以下の仕様の大電流加速器を想定しその技術的課題を以下に列挙した。

(大電流加速器の仕様)

- 形式 線形加速器 (高周波加速)
- 構成 図3.1に示す。以下の要素から構成される。
イオン源 + 高周波四重極型リアック (RFQ)
ドリフトチューブ型リアック (DTL) + 結合空洞型リアック (CCL)
- 加速粒子 陽子
- 平均電流 数10mA～数100mA

- ビームエネルギー 500MeV～数GeV
- ビームパワー 数10MW～数100MW
- 稼働率 メンテナンス期間を含んで70～80%
(ほぼ1年間連続使用する)

(課題)

○イオン源のフィラメント寿命

大電流イオン源は現状技術では約100mA であるが、これを数台用いることになる。しかし、大電流イオン源を長期間安定に使用する為には、フィラメントを用いないプラズマ生成方式等の開発が必要である。即ち、現行のフィラメント方式では1年間連続で運転することは難しい。(現行の寿命は2週間程度；核融合NBI イオン源開発実績)

○クライストロン 寿命

長時間運転を指向するには、RF供給源であるクライストロンの安定作動性が懸念される。フィラメントの稼働率を高く維持するためには、100台程度のクライストロンを1年間安定に連続作動させる必要がある。若しくは、稼働率の低下をきたさない程度に故障したクライストロンを円滑に交換修理するメンテナンス体制を確立しておく必要がある。

○ビーム損失の低減

大電流加速器のメンテナンスを考えたとき、ビームロスによる加速管の放射化は避けなければならない。このため、ビーム損失割合を 10^{-5} ～ 10^{-6} に抑える必要がある。

このようなビームコントロールの実績はなく、ビームモニター方法の開発を含め、工学的装置として開発するには課題が大きい。(物理実験用装置のように、瞬間的に高性能が得られれば良いものとは安定性に関する要求が異なってくる)

○非破壊ビームモニター の開発

ビームモニター については、大電流であるために破壊分析的な手法はとれなくなる。従って、非破壊計測方法を確立する必要がある。(これまで開発されたモニター類は主に破壊分析的な装置である。)

○Continuous Wave Radio Frequency Quadrupole (CWRFQ)の開発

これまで開発されたRFQ は小電流のCWか、大電流のパルス 運転用のものであり、大電流CWRFQ の運転経験がない。従って、大電流CW運転につきまとう熱負荷の対策が十

分に取りきれぬかが不明確であり開発課題が大きい。

○大電流 Drift Tube Linac (DTL) の開発

ビームの収束性を高めるために初段加速部のDTLにおいて特に強い磁場が必要となる。電磁石(Qマグネット)でこれを実現させようとする場合には1000A程度の直流電流が必要となり、ドリフトチューブ内に封入した際の冷却性能が課題となる。電磁石をやめて、永久磁石を用いるオプションもあるが、耐久性、制御性等の新たな課題の克服がいる。

○大電力 Radio Frequency (RF) 源の開発

大電力RFを加速管に供給するRFフィードバックに開発課題がある。

3.2.2 ハイブリッド利用(加速器・未臨界炉インターフェイス)

加速器と未臨界炉とのインターフェイス部の課題について以下に記載する。

○原子炉制御・計測機器や燃料交換機器等とビームラインとの配置上の干渉

1次冷却材のバウンダリーを確保する観点からはビームラインは上部から未臨界炉体系に導かれることが望ましいが、その場合、原子炉上部方向に存在する機器(制御、計測、燃交)との干渉が懸念される。

○偏向磁石、ビーム径拡大磁石の放射化、損傷対策

加速粒子を未臨界炉へ導くのにビームラインに偏向磁石やビーム径拡大磁石を設置するが、炉心に近接して設置されるために炉心からの漏洩中性子の照射によりこれらの磁石類が放射化したり損傷を受けることが懸念される。

○ビーム窓の照射損傷、熱負荷、冷却、寿命、材料選択

高エネルギー、大電流加速器であるためビームパワーが数10MW～数100MWと大きい。この為ビーム窓の照射損傷が懸念される。と同時に、熱負荷も $\sim 800\text{kW/cm}^2$ と大きく、冷却方法等に課題がある。ビーム窓は原子炉系(未臨界炉)と加速器系との境界(1次冷却材バウンダリー)を形成するためその構造健全性については、特に留意する必要がある。

○ビーム窓の交換方法

ビーム窓の材料の選択にもよるが、加速器・核分裂ハイブリッド炉施設の寿命期間中にビーム窓を何回かは交換する必要がある。ビーム窓の交換方法を具体化しておく必要がある。

○ビーム窓の破損時対策／原子炉1次系パウダリ-の確保

ビーム窓は原子炉系の1次冷却材パウダリ-を形成する。仮に、ビーム窓の破損が生じた場合にも、1次冷却材が加速器系（加速管）側に漏出してゆかないように対策を取る必要がある。

○ビームラインを通しての中性子ストリーミング対策

ビームライン（未臨界炉系へのビーム導入部）は原理的に空洞（真空）である為、炉心部で発生した中性子（高エネルギー）を炉心から外部へ放出（ストリーミング）させ易い。

既に述べてある磁石や機器類の損傷に加えて原子炉上部のアクセス領域への遮蔽上のインパクトが懸念される。

○燃料交換時のビームラインの除去

燃料交換時にはビームラインが邪魔になる可能性がある。そのときには、ビームラインの除去方法を具体化してゆく必要がある

配置上の干渉の有無

固体ターゲット／熔融塩

3.2.3 原子炉（未臨界炉）

3.2.1項に記載したように加速器と未臨界炉との組み合わせを大別し、今度は原子炉側からみると未臨界度が浅い方に課題が多い。

そこで k_{eff} が0.95～0.99程度の未臨界炉を想定しその課題について以下に記載した。

○ピンバンドル型燃料

酸化物燃料を用いる場合には国内でも常陽、もんじゅの実績があり、ピンバンドル型燃料の製造方法は特に課題はない。但し、TRU燃料の場合には、発熱量や放射線放出量が大きく、燃料製造工程での遮蔽対策などが課題である。

一方、金属燃料や窒化物燃料については、研究開発段階であり、製造方法自体の確立が課題となる。

○ターゲットの構造；ローホール除熱性能確認の熱流動実験、構造上の強度

ターゲットについてもターゲット部での中性子発生密度を平坦化させたり、除熱性能を向上させるなどの設計上の要求を満たす必要から、その構造についての工夫が必要であ

る。そのため、性能確認の各種試験を必要とする。

○ターゲットの交換

放射線損傷等からターゲットの交換が必要となった場合の対応について検討しておく必要がある。

○ターゲット部の中性子発生分布の最適化設計

ターゲットについてもターゲット部での中性子発生密度を平坦化させると同時に、除熱性能を向上させるなどの設計上の検討が必要である。

○MA消滅炉の場合、TRU(MA)のインベントリの確保

消滅炉の場合、TRU(MA)の初期インベントリとして、～3トが必要とされている。現時点では、まだ再処理工程でのTRU核種分離は実現しておらず、実用化までには核種分離等が実用化していることが必要である。

○被覆管材料選択

未臨界炉の場合には、制御棒誤引き抜き等の反応度投入を回避できるのでベレットの溶融限界にたいしては制約が少ない。そこで、フエス特性の良い被覆管材料の開発が行われることにより燃料の寿命を大幅に改善でき、炉心性能向上が期待できる。

○燃焼欠損反応度の制御

未臨界度が浅い場合には、燃焼による反応度スイングに留意が必要であり、未臨界状態を常に維持できるように制御する必要がある。反応度制御系（通常の原子炉における制御棒）を設けることは一つの解決方法ではあるが未臨界炉としての利点が損なわれる。

○反応度モニターの開発

未臨界度が浅い状態で未臨界炉としての安全上の利点を生かすためには、未臨界度の常時監視が必要である。許認可上は未臨界性の担保等が必要となるとすれば、未臨界度の制御やモニターの方法について確立しておく必要がある。現在、適切な未臨界度モニターが開発されていない。

○高エネルギー中性子の遮蔽対策

スプレッション反応で生成する高エネルギー中性子は数10MeV以上の成分は割合が少ないものの遮蔽上は大きなインパクトを持つと予想される。中性子の発生については方向依存性

が大きく、特にビーム前方方向について必要となるコンクリート遮蔽厚が10m程度になりそうである。この為、厚い遮蔽コンクリートの設置を巡る配置上の問題や、コンクリートの冷却の問題が課題となる。

○溶融燃料

溶融燃料については経験が十分ではなく、基本的なところからの研究開発が必要と考えられる。特に、以下の項目について検討が必要である。

- ・ 溶融塩炉システム構成
- ・ 溶融塩炉内部構造（含む、流路構造）
- ・ 上部構造（含む、取り外し可否）
- ・ 高温シール
- ・ 構造材の選択；物性値が不明（共存性）
- ・ 燃料交換方法
- ・ 化学処理のプロセスに開発要素が大きい。

3.3 システム概念の提案

3.2節において加速器・核分裂ハイブリッド炉の課題を整理した結果、未臨界炉系に対しては、主として加速器とのインタフェース部に課題が多く存在することがわかった。即ち、ビーム窓廻りの構造について、健全性（照射損傷等）、安全性（ビームダクト方向への1次冷却材の漏洩等）、運転・保守性（ビーム窓等の交換）、配置（機器の干渉、遮蔽等）などを考慮した炉概念の構築が必要である。このためには、中性子発生部としてのターゲットと、MA/F P消滅系としての燃料の各状態（固体又は液体）に応じたシステム概念をイメージする必要があるので、以下各ケースにつき想定される概念を比較検討し、もっとも技術的成立性が高く現実的と考えられる概念を提案することとした。

(1) システム構成の想定ケース

本未臨界炉のシステム構成に当たっては、ターゲットと燃料の各状態に応じて、次の各ケースが考えられる。

- ① ケースA：固体ターゲット、固体燃料（集合体）（← or ブランケット）
- ② ケースB：固体ターゲット、液体燃料

③ケースC：液体ターゲット、固体燃料（集合体）

④ケースD：液体ターゲット、液体燃料

これらの各ケースについて、想定される未臨界炉のイメージをもとにシステム構成を比較した結果を表3.1に示す。各ケースの構成検討結果は次の通りである。尚、本検討においては、未臨界炉であり、制御棒は不要とした。

(a) ケースAの未臨界炉の構成

このケースでは、通常の高速度炉システムを採用することができると考えられる。

従って、炉構成としては通常のループ型原子炉の概念が考えられ、実験炉や原型炉の一部を改造することによっても構築し得る特徴を有している。

このケースで、燃料をターゲットとしても用いられるとすると、炉心部（即ち、ターゲット部）に直接ビームを入射する概念とすることができる。図2.14に示されるBNL提案の概念は、このような考え方に沿ったものであると考えられ、比較的小型の炉心として、この炉心を内包する冷却筒（原子炉容器相当）をバウンダリとしたもので、ビーム入射は横方向から行っている。更に、冷却筒の周りにもFPターゲット等を設置している。この概念の特徴は、ビームを振り分け、ターゲット側をモジュール化して、容量を可変としている。但し、この概念は工学的には各モジュールの交換（ビーム入射による冷却筒の照射損傷と燃料交換を考慮）に関する課題等開発課題は多い。一方、工学的に構造を成立させることができれば、

○ビームを分岐させて用いる、

○容量可変で、大容量への対応が可能、

○モジュール毎に交換できる、

等のメリットが考えられるので、フォローが必要であろう。

(b) ケースBの未臨界炉の構成

この場合、液体燃料（溶融塩等）が固体ターゲットの冷却材を兼ねる場合と、固体ターゲット廻りの重水減速材を介して液体燃料を照射する場合が考えられるが、文献調査結果では、LANLが後者の概念を採用しており、ここではこれを対象概念とする。

この場合、ターゲット廻りに重水タンクを設置し、内部に液体燃料を充填した細

管を配する。このようなシステムとしては新型転換炉の概念があり、液体燃料の取扱いを別とすれば、構造概念としての可能性を有している。

尚、ターゲット及びビーム窓の除熱並びに重水タンクからの崩壊熱除去のためにタンク廻りを軽水で覆っているため、この軽水タンクがガードベッセルをも兼用できる特徴を有しており、未臨界炉から外部への燃料漏洩は多重に防護される。

(c) ケースCの未臨界炉の構成

液体ターゲットの場合、ターゲットを循環させるので、ターゲットが冷却材を兼用する概念と、ターゲット循環系と燃料冷却系とを分離した概念が考えられる。前者の場合、ビーム窓廻りを液体ターゲットが流れつつ燃料方向に向かうとすれば、通常の高速度炉等の流路方向とは逆となり、流路構成が複雑になる可能性がある。これに対し、後者の分離した概念では、多重の流路構成とはなるものの、ターゲット部と燃料部の取扱いを独立にできるメリットを有している。このため、複数のターゲット流路及びこれに対応した燃料冷却系を設けることができる（モジュール化が可能である）こととなり、容量その他に設計の裕度が増す。図2.14に示されるBNL提案の概念における冷却材流路に液体ターゲットを用いると、このようなモジュール化概念が考えられる。

(d) ケースDの未臨界炉の構成

本ケースの場合、液体燃料はターゲット中に混入している。従って、本ケースは所謂熔融塩炉型のハイブリッド炉である。この概念は構造的には極めて単純化できる可能性を有しているが、最も重要な課題として3.2節に示したような熔融塩炉の成立性があり、開発要素が大きい。

(2) システム概念の提案

各ケースにおける未臨界炉の技術的な成立性は上述した通りであり、最も現実的という観点に立てば、ケースAの概念（固体ターゲット、固体燃料、ビーム上方入射）が通常の高速度炉を一部改造することによって構築し得る点から有望である。この概念を拡張して、小型ターゲット系をモジュール化して、分岐したビームに対応させる大容量化システムも考えられる。

ここでは、従来の高速度炉を改造する概念としてのケースAをベースに、システム概

念構築に当たっての留意点について検討した。

(a) 加速器系とのインタフェース

炉容器と加速器系のインタフェースはビームライン及びビーム窓であり、システム概念を提案する場合、以下の事項を考慮する必要がある。

① ビーム入射方向

ビーム入射方向としては、上方向入射がバウンダリとしての炉容器とのインタフェースは取り易い利点を有しているが、固体ターゲット及び固体燃料の燃料交換系とは干渉する可能性があり、燃料交換方法について検討する必要がある。更に、高い照射環境にあるビーム窓の交換についても考慮する必要があるので、これらの配置に留意するとともにシステムとして整合の取れた概念としてまとめる必要がある。

また、ビームライン廻りの遮蔽に注意する必要がある。

② ビームライン雰囲気

ビームライン内は原則として空洞のため、真空雰囲気となる（ヘリウム雰囲気とする案も考えられるが、取り敢えずの検討条件としては、保守側に真空雰囲気として考える）。従って、炉容器とのインタフェース部において、ビームライン側が外圧を受けることとなる他、ビーム窓の冷却上、ビームライン側が断熱条件相当になることに注意する必要がある。

また、ビーム窓が破損した場合を想定すると、ビームライン側に炉容器内流体が漏出するので、ビームライン中に締切用の弁を設ける等の対策が必要である。これを含め、バウンダリ、被曝防止の観点からの検討が必要である。

(b) その他

上記加速器系とのインタフェースの他、ターゲット構造、ターゲットの交換等に留意する他、全体としてシステム簡素化を図ることが重要である。システム簡素化に当たっては、未臨界体系であることを活かして、通常の高速度炉では安全対策上冗長となっていた設備を削減する等が考えられる。

以上の留意点も踏まえたシステム概念を図3.2に示す。また、主要目の例を、加速器の主要目も含めて表3.2に示す。

3.4 必要なR&D

加速器・核分裂ハイブリッド炉の技術課題について3.2節に記載の各項目を表3.3に一覧し課題克服の難易度、並びに解決方法を整理した。

表3.3の課題の中、主なもの（難易度A）について、研究開発の方向性を以下に纏めた。

（加速器本体）

○イオン源のフィラメント寿命

Electron Cyclotron Resonance (ECR)イオン源等のフィラメントを用いないプラズマ生成が期待できる。現在、これらのプラズマ生成では大電流化が鍵を握っている。

フィラメントを使わないプラズマ生成の見通しがえられない場合については、イオン源を2系統以上用意して、その円滑な切り替え使用とフィラメントの頻繁な交換方法とを確立して置く必要がある。

○Continuous Wave Radio Frequency Quadrupoleの開発

RFQのCW化に伴って、除熱が顕著な課題となってくる。また、チューナー等の可動部分が多い構造は安定性などで課題を残すことになる。十分なR&Dを行って、高品質ビームが安定に取り出せる高性能大出力RFQを実現しておく必要がある。

○大電流 Drift Tube Linac(DTL), Coupled Cavity Linac(CCL)の開発

DTLの大出力化に伴って、除熱が顕著な課題となってくる。特に大電流ビームの発散を抑えるために強力な電磁コイルが必要となる。これの除熱対策などで課題を残すことになる。一方、永久磁石を選択することも考えられるが、磁石の劣化や、運転制御性に課題がある。十分なR&Dを行って、高品質ビームが安定に取り出せる高性能大出力DTL, CCLを実現しておく必要がある。

○大電力RF源の開発

クライストンの市販品の中に、必要な要件を満たすものが少ない為、RF電源入手性等に留意する必要がある。

○ビーム損失の低減

ビーム品質を改善する為には非破壊ビームモニターの開発が必要である。

(加速器・未臨界炉インターフェイス)

○ビーム窓の照射損傷、冷却、材料選択

ビーム窓の選択や、その材料の特性に関して十分な検討が必要である。

(未臨界炉)

○ピンバンドル型燃料 (ペレット)

TRU 入りペレットの製造上の課題は、主に放射線発生が大きいという問題である。

放射線対策の状況を整理して置くことが望ましい。

○ターゲットの構造

ターゲットの設計に絡んで構造上の性能確認試験を実施する必要がある。

○TRU(MA) のインベントリの確保

初期インベントリ3トン を確保するには、再処理施設での核種分離計画が軌道に乗ってゆく必要がある。

○被覆管材料選択

核破碎反応により100 MeV以上の高エネルギー中性子が発生するが、これら高エネルギー中性子による被覆管材料の照射特性は未知の部分がある。材料選択に当たっては十分に吟味が必要であり、照射データを揃える等の検討も必要である。

○反応度モニターの開発

実効増倍率が約0.9に対応する、約-30\$の深い未臨界度を監視していく必要があり、反応度の絶対値を常時モニター出来る装置の開発が要る。

○高エネルギー中性子の遮蔽対策

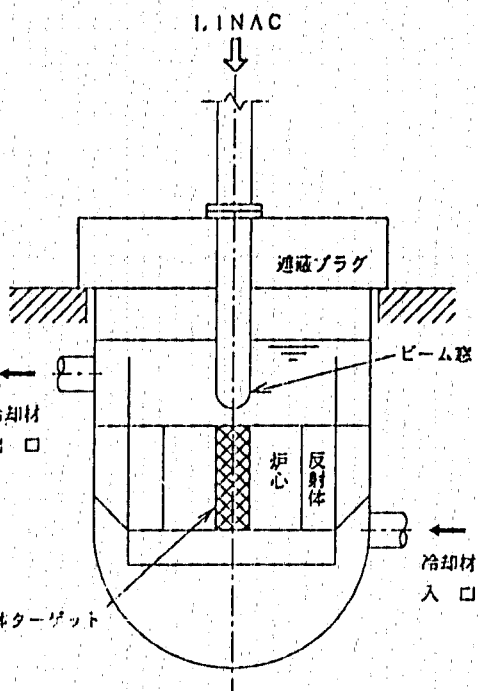
設計評価手法の確立と、実験による検証とが必要である。

○溶融燃料

- ・溶融塩炉システム構成 ・高温シール
- ・構造材の選択；物性値が不明（共存性）
- ・化学処理のプロセスに開発要素が大きい。

等未知の事項が大きく着実な研究開発が必要となる。

ターゲット+固体燃料（集合体）



ターゲット
集合体
（and/or遮蔽体）

支持構造物
プレナム構成/流路構成用構造物
（ガイド等）
遮蔽等

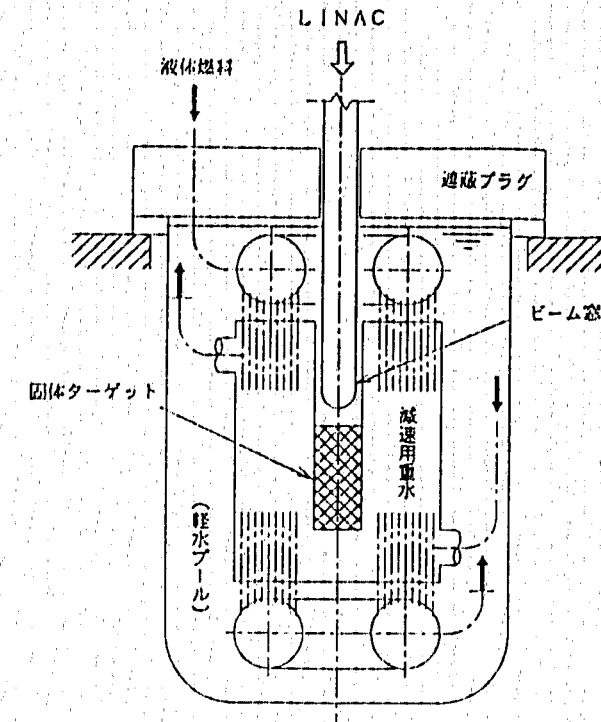
器本体
部構造（遮蔽プラグ）
ム窓
系ノズル

交換機
出入機
ム窓交換系

の高速炉概念を踏襲できる。
部の配置に課題がある。

界炉として安全性高い（他ケースも同じ）。

固体ターゲット+液体燃料



○固体ターゲット
○液体燃料（減速材を介して固体ターゲットからの
発熱を除去する）
○減速材

○固体ターゲット支持構造物
○液体燃料ガイド
○熱遮蔽等

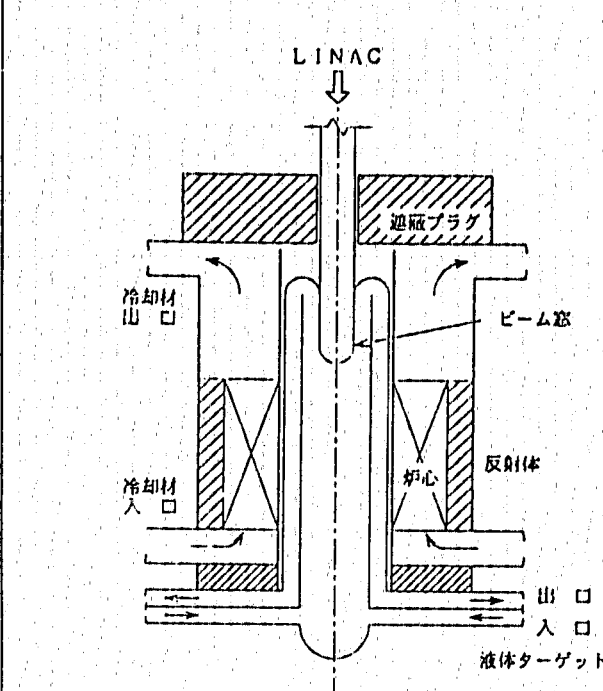
○炉容器本体
○炉上部構造（遮蔽プラグ）
○ビーム窓
○冷却系ノズル（液体燃料出入口ノズル）

○配管
○ビーム窓交換系

○炉上部簡素化が図れる。
●液体燃料導入に伴う開発要素あり。

○ビーム窓破損時の安全性有利。

液体ターゲット+固体燃料（集合体）



○燃料集合体
○反射体

○炉心支持構造物（燃料、反射体）
○各部プレナム構成/流路構成用構造物
（ガイド等）
○熱遮蔽等

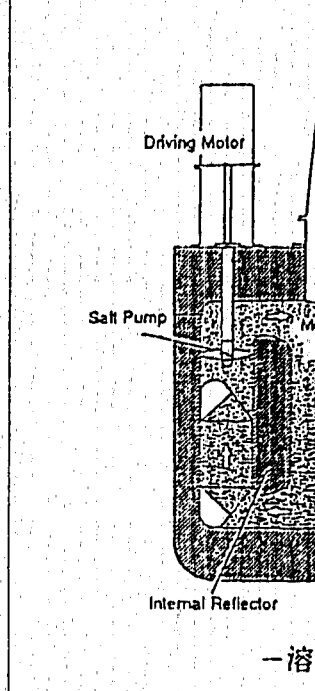
○炉容器本体/炉上部構造（遮蔽プラグ）
○ビーム窓
○ターゲット出入口ノズル
○冷却系ノズル

○燃料交換機
○燃料出入機
○ビーム窓交換系

○ターゲット系と炉心冷却系を分離できる。
●液体ターゲット導入に伴う開発要素あり。

○ターゲット系と燃料系の事故を分離できる。

液体ターゲット+液体燃料



○ターゲット/燃料
○反射体

○反射体支持構造物
○液体燃料流路構成用構
○熱遮蔽等

○炉容器本体
○炉上部構造（遮蔽プラグ）
○ビーム窓
○冷却系ノズル（液体燃料

○配管
○ビーム窓交換系

○システム簡素化が図れる。
●開発要素が多い。

○熔融塩炉としての安全

表 3. 2 加速器・核分裂ハイブリッド炉の主要目例
Main Features of an Accerelator-Driven Converter System

項 目	仕 様 等 の 例
〔加速器〕	
イオン源のフィラメント 寿命	1年
ビーム損失の低減	$10^{-5} \sim 10^{-6}$
非破壊ビームモニタ	プロファイル、エミッタンス
CWR F Q	低エミッタンス、100mA
大電流D T L	低エミッタンス、100mA
大電力R F 出力/寿命	1MW 以上/1年
ビームエネルギー	60MW以上 (1.5GeV, 40mA)
〔加速器・未臨界炉インタフェース〕	
ビーム入射方式	上方向入射
ビーム窓 材料	HT-9又はODS鋼
寿命	1年/交換
内部雰囲気(加速器側)	真空又はヘリウムガス充填
ビームラインバウンダリ機能	ビームラインに閉鎖弁設置
〔未臨界炉〕	
○燃料 型式	ピンバンドル型
ペレット	TRUペレット
燃料インベントリ	3ton (初期)
被覆管材質	ODS鋼等
交換	燃料交換機による
○ターゲット 形状	ターゲット集合体
材質	固体(タンゲステン等)
交換	燃料交換機兼用

表 3. 2 加速器・核分裂ハイブリッド炉の主要目例（続）
 Main Features of an Accelerator-Driven Converter System
 (Continued)

項 目	仕 様 等
〔未臨界炉〕	
○原子炉構造 構造形状	通常の高速炉原子炉構造概念に同じ 〈ex. 常陽又はもんじゅの改造による〉 (炉内構造物等は流用)
反射体 材質	ステンレス鋼
○燃料交換系	燃料交換機、燃料出入機
燃料交換機	ビーム窓回転プラグ
燃料出入機	伸縮アーム式
ビーム窓回転プラグ	炉内中継式／キャスク型燃料出入機
○冷却系	ダミープラグ搭載ビーム窓交換用
冷却材	ナトリウム
冷却系機器	熱交換器、循環ポンプ他

表 3. 3 課題と解決策

Research Items and Methods To Solve Them

項目 (課題)	仕様	難易度*	解決策
(加速器本体)			
○イオン源のフィラメント寿命	1 yr	A	R & D
○ビーム損失の低減	10 ⁻⁵ ~10 ⁻⁶	A	R & D
○非破壊ビームモニター の開発	プロフィール、エミッタンス	A	R & D
○CWR F Qの開発	低エミッタンス、100mA	A	R & D
○大電流DTL, CCL の開発	低エミッタンス、100mA	A	R & D
○大電力RF源の開発	1MW 以上、寿命1 年間	A	R & D
(加速器・未臨界炉インターフェイス)			
○ビームラインとの配置上の干渉		C	設計
○磁石・機器類の放射化、損傷対策	保守時接近可能	B	R & D
○ビーム窓の照射損傷、冷却、材料選択		A	R & D
○ビーム窓の交換方法		B	設計、R & D
○ビーム窓の破損時対策		B	設計、R & D
○ビームラインからの中性子ストリーミング 対策	機器放射化防止	B	設計、R & D
○燃料交換時のビームラインの除去	配置上不干渉	C	設計
(未臨界炉)			
○ピンバンドル型燃料 (ペレット)	TRU ペレット	A	R & D
○ターゲット の構造		B	設計、R & D
○ターゲット の交換		C	設計
○ターゲット 部の最適化設計	中性子の一様発生	C	設計
○TRU(MA) のインベントリの確保	初期インベントリ3トン	A	R & D
○被覆管材料選択	NVT>10+23n/cm**2	B	R & D
○燃焼欠損反応度の制御	$\Delta k_{bu} < 3\%$	C	設計
○反応度のモニターの開発	~30\$ の未臨界度	B	R & D
○高エネルギー 中性子の遮蔽対策	$E_n > 100\text{MeV}$	B	設計、R & D
○溶融燃料		A	R & D
<ul style="list-style-type: none"> ・溶融塩炉システム構成 ・高温シール ・構造材の選択；物性値が不明（共存性） ・化学処理のプロセスに開発要素が大きい。 			

* A；現状技術では対応できない。（長期のR & Dを要する）

B；やや難、C；現状技術で対応可能。（比較的容易なR & D）

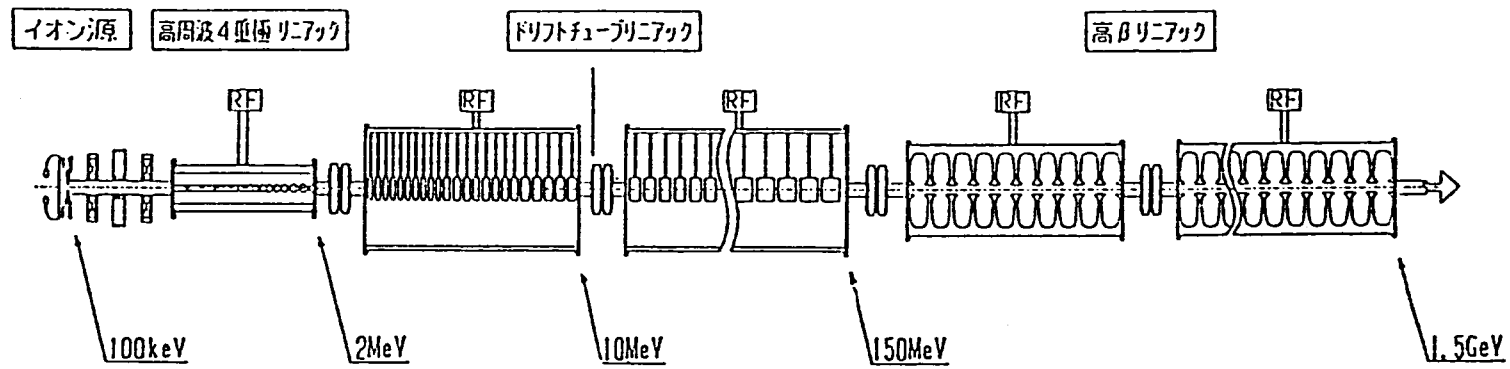


図 3. 1 大電流加速器の基本構成

A Basic Structure of a Large Current Accerelator

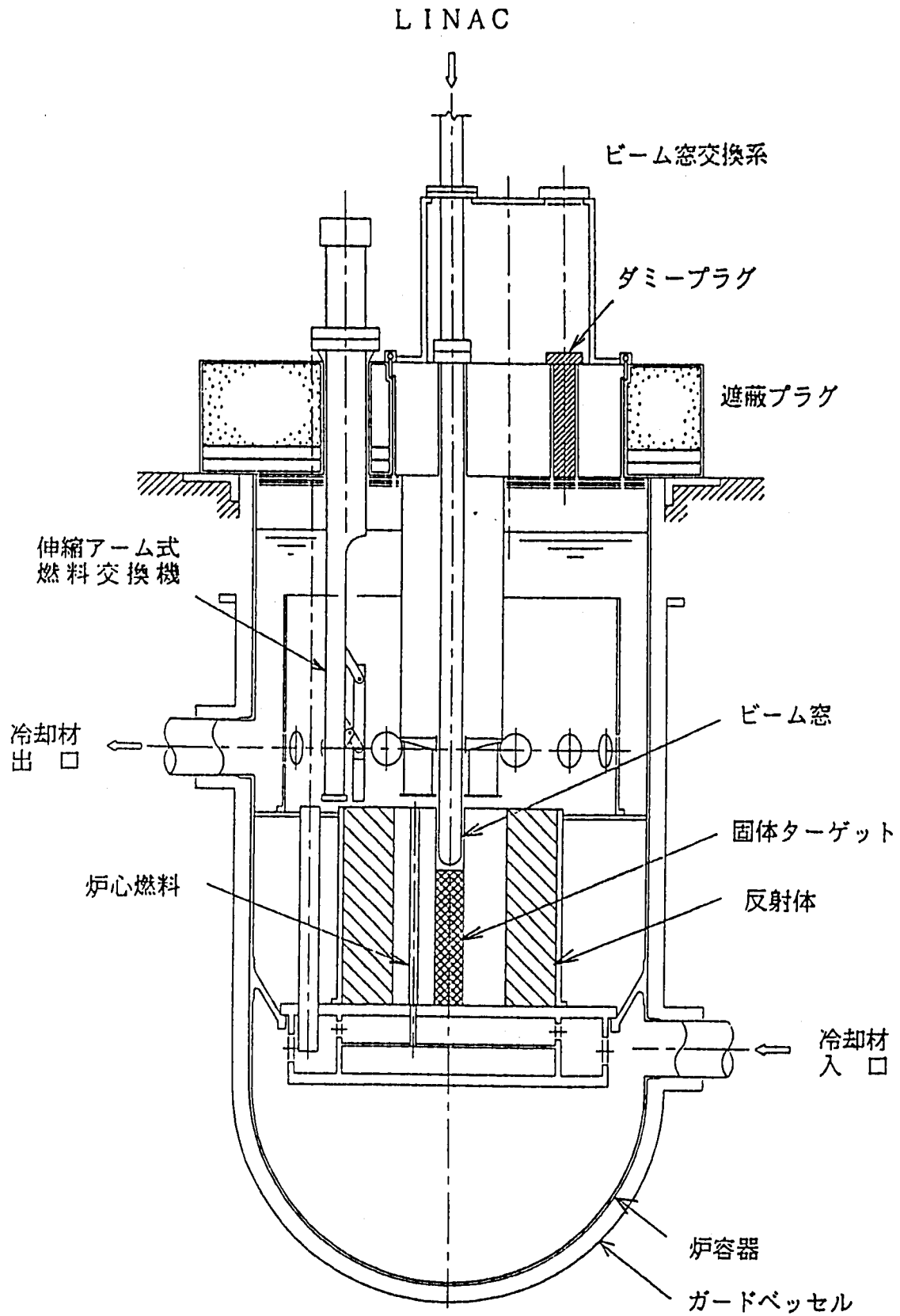


図 3. 2 加速器・核分裂ハイブリッド炉のシステム概念
 A System Concept of an Accelerator-Driven Converter

4. 考 察

前章まで加速器・核分裂ハイブリッド炉について検討してきたが、これに対して以下の点が指摘される。

- (1) 加速器・核分裂ハイブリッド炉の概念として提案されているもののうち、現状技術の外捜で成立性が見込めるものは、BNLと日本原子力研究所が提案している未臨界高速炉と加速器とを組み合わせた概念である。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高速炉開発で培ってきたものの延長線上にあると考えられる。一方、熔融塩炉心を始めとする液体燃料炉心の概念については更にもう一段の飛躍を必要とする。又、いずれの場合にしても、スプレション反応で中性子を大量に発生させるために高エネルギー大電流の陽子ビームが必要となるが、現状技術ではまだ未解決の事項である。そのため、大強度陽子加速器については勢力的に開発を進めていく必要がある。
- (2) 加速器・核分裂ハイブリッド炉の利用目的によって、システムの選択が異なってくるので予め目標を決めておく必要がある。

(例)

fast-solid-MOX(Metal) ==> MA の消滅

fast-liquid-molten salt ==> MA の消滅

thermal-liquid ==> MA, FP の消滅

- (3) 発電炉としての利用を主に想定する場合には、加速器を運転するのに要する電力は発電所の内部消費となるので極力小さく抑える必要がある。発電以外の利用(MAの消滅処理等)を主目的とする場合には、内部の消費電力の割合が30%程度でも目的の重要性如何によっては許容されることがあり得る。しかしこの場合も、目的のなかで発電の占める割合が大きい場合には、建設コストや発電コストへの影響を抑えよとの意味で例えば”加速器の建設コストが原子炉の10%以下で、運転コスト(消費電力)が発電量(生産量)の10%以下であること”、等の死なな要求がでてくる可能性がある。現在研究を行っている各機関では、もっと楽観的な想定で進めようとしているので、実用化を推進する段階でキツプが生じないように開発ターゲットを適切に設定しておくことが必要である。

- (4) 多段マイクロtron で10mAのビームを出すのは、工学的施設として考えると挑戦的な課題である。しかしながら、既存の原子炉施設に加速器を付設するときの状態をイメージする場合には、リアック と比べてマイクロtron の魅力は大きい。即ち、リアック は500m~1km の長さを要するが、多段マイクロtron の場合には敷地面積が約3600m²(60m*60m) と小さくて済む。従って低電流オプション の追求、例えば浅い未臨界炉と10mA未満の多段マイクロtron の組み合わせについては更に追求してみる価値がある。
- (5) 米国の超電導超大型粒子加速器 (SSC) 計画などへの巨費を投じる基礎科学に風当たりが強まるなかで、本検討の対象とした加速器は十分に実用になり得ることから新たに注目が集められている。ロシアや欧州 (CERN) 等も本件に関する今後新たな提案を起こして行くことが予想されるので、それらの動向にも留意していくことが望ましい。

5. お わ り に

本報告書では、今までに公表されている加速器・核分裂炉ハイブリッドシステムに関する主な文献の調査し、本システム概念についての検討を行った。

今後はより具体的に実際の炉、例えば「常陽」に、加速器を設置すればどの様になるか検討を行う予定である。

尚本報告書の作業は、三菱原子力工業株式会社横堀 仁氏及び広田耕一氏にお願いしたので、ここで謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) H. Takahashi, "The use of minor actinides and a small power proton accelerator for fast reactor with a high breeding gain," The Specialist Meeting on Accelerator-based Transmutation, March(1992), Wurenlingen, Switzerland.
- (2) Takahashi, H. Rief, "The Energy requirement for Transmuting Fission Products," OECD/NEA second general meeting of International Information Exchange Program on Actinide and Fission Product Separation and Transmutation, Nov.(1992), Argonne National Laboratory, U. S. A.
- (3) H. Takahashi, "The Role of Accelerator in the Nuclear Fuel Cycle," The 2nd Symposium on ADVANCED NUCLEAR ENERGY RESEARCH -Evolution by Accelerators-, Jan. (1990), Mito, Japan.
- (4) H. Takahashi, H. Rief, "Concepts of Accelerator Based Transmutation Systems," invited paper, The Specialist Meeting on Accelerator-based Transmutation, March(1992), Wurenlingen, Switzerland.
- (5) G. J. V. Tuyle, M. Todosow, M. J. Geiger, A. L. Aronson, H. Takahashi, "ACCELERATOR-DRIVEN SUBCRITICAL TARGET CONCEPT FOR TRANSMUTATION OF NUCLEAR WASTES," Nuclear Technology, Vol. 101, Jan. (1993).
- (6) M. Mizumoto, K. Hasegawa et al., "Development of Proton Linear Accelerator and Transmutation System," Int. Conf. and Technology Exhibition on Future Nuclear System: Emerging Fuel Cycles and Waste Disposal Options GLOBAL' 93, Sep. (1993), Seattle, Washington.