

加速器利用検討会報告書

1995年1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下さい。

〒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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, OARAI Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita-machi, Oarai-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) 1991

加速器利用検討会報告書

江本隆、鳥居建男、武井早憲

要 旨

原子炉の使用済燃料を再処理する際に発生する高レベル放射性廃棄物の中には、長寿命の放射性物質が含まれている。長寿命の放射性廃棄物はTRUとFPに大別されるが、この中でもFPは比較的生成量が多いにもかかわらず、中性子の断面積が小さい核種が含まれるため、原子炉単独で消滅処理を行うことが困難である。このため、原子炉以外の核変換装置として加速器の利用が考えられている。加速器を用いて消滅処理を行うためには、従来の研究用・工業用加速器に比べて、はるかに大出力かつ連続的なビームが必要となる。そこで、動燃事業団では、大強度ビーム加速を目的とした要素開発試験として、10 MeV - 20 mA の大強度CW（連続波）電子線形加速器の開発を行っている。

この加速器（以下、PNC加速器という）は、世界でも類例を見ないビーム強度等の特徴を有しているため、本来の研究目的の他にも、様々な利用が考えられる。本来目的以外の利用法について、その可能性を検討するため、大洗工学センター内に「加速器利用検討会」を設け、調査を行った。本報告書は、種々の報告と議論などの概要を取りまとめたものである。

加速器利用委員会 委員構成

主査 江本 隆 基盤技術開発部先進技術開発室
 副主査 鳥居 建男 安全管理部放射線管理課
 事務局 武井 早憲 基盤技術開発部先進技術開発室

委員

計測技術検討ワーキンググループ

橋本 周 安全管理部放射線管理課
 木曾原直之 基盤技術開発部熱流体技術開発室
 山田 美一 東海事業所、プルトニウム燃料工場製造加工部製造課
 大村 明子 基盤技術開発部先進技術開発室

照射利用検討ワーキンググループ

小井 衛 システム開発推進部研究管理室
 中島 尚子 安全管理部安全対策課
 赤坂 尚昭 燃料材料開発部照射材料試験室
 立邊 和明 本社、核燃料サイクル技術開発部
 プルトニウム燃料開発室
 北村 了一 実験炉部照射課

応用技術検討ワーキンググループ

武井 早憲 基盤技術開発部先進技術開発室
 根岸 仁 基盤技術開発部構造・材料技術開発室
 小山 真一 燃料材料開発部照射燃料試験室
 清野 裕 安全工学部プラント安全工学室
 北谷 文人 東海事業所、核燃料技術開発部先端技術開発室

目 次

1. はじめに	1
2. 検討方法	2
3. 検討結果	4
3. 1 計測技術	5
3. 2 照射利用	9
3. 3 応用技術	16
4. まとめ	30
5. 参考文献	31
付録 1 : PNC加速器の特徴と放射線 (OHP集)	
付録 2 : 講演OHP集	
付録 3 : 加速器利用検討会中間報告 (平成5年度第1回技術会議OHP)	

1. はじめに

原子炉の使用済燃料を再処理する際に発生する高レベル放射性廃棄物の中には、長寿命の放射性物質が含まれている。長寿命の放射性廃棄物はTRUとFPに大別されるが、この中でもFPは比較的生成量が多いにもかかわらず、中性子の断面積が小さい核種が含まれるため、原子炉単独で消滅処理を行うことが困難である。このため、原子炉以外の核変換装置として加速器の利用が考えられている。加速器を用いて消滅処理を行うためには、従来の研究用・工業用加速器に比べて、はるかに大出力かつ連続的なビームが必要となる。そこで、動燃事業団では、大強度ビーム加速を目的とした要素開発試験として、10 MeV-20 mAの大強度CW（連続波）電子線形加速器の開発を行っている。

この加速器（以下、PNC加速器という）は、世界でも類例を見ないビーム強度等の特徴を有しているため、本来の研究目的の他にも、様々な利用が考えられる。そのひとつに、大強度ビームを利用することにより、従来の工業用加速器に比べて短時間で目的とする成果を得る、もしくは同時に複数の処理を行うなど、“量的”な大きさを利用したものが考えられる。もうひとつの利用法として、CW加速器であることから従来の研究用加速器とは異なる特徴を生かした研究等の“質的”な可能性が考えられる。

そこで、本来目的以外の利用法について、その可能性を検討するため、大洗工学センター内に「加速器利用検討会」を設け、調査することとした。検討会は、主としてセンター内の若手で構成され、検討会独自の調査及び外部専門家からの提案を基に、幅広い分野の利用テーマの提案をまとめることとした。

2. 検討方法

調査検討方法として、下記の3つの方法で行うこととした。

- (1) . PNC加速器の特質を把握する。
- (2) . 外部専門家を招聘し、加速器利用に関する情報収集を行う。
- (3) . 検討会内にワーキンググループを設けて、利用分野別に検討する。

また、スケジュールは以下の通りである。

第1回検討会：PNC加速器の特徴把握、活動計画検討（平成4年7月3日）

第2回検討会：講演「自由電子レーザーと低速陽電子利用」（平成4年10月30日）

（講師：高エ研・榎本助教授）

第3回検討会：講演「大電流電子ビームの放射線利用」（平成4年11月13日）

（講師：東北大・中村教授）

ワーキンググループの設置検討

第4回検討会：講演「ターゲットの構造と利用」（平成5年3月11日）

（講師：スイスPSI・Dr. 武田）

ワーキンググループ中間報告

第5回検討会：ワーキンググループ活動報告（平成5年3月30日）

第6回検討会：報告書のまとめ（平成5年4月26日）

ここで、検討会内に設けたワーキンググループとその主旨を以下に示す。

○ 計測技術検討ワーキンググループ

大電流加速器のターゲットやビームダンプ近傍では、 $10^4 \sim 10^5$ Gy/h程度という極めて多量の制動X線が放出される。また、将来はターゲットの種類により、多量の中性子の発生も可能である。しかしながら、このような大線量場の計測技術は確立されておらず、照射利用、及び工学試験規模の加速器開発を行う上ではその技術開発が必要である。本ワーキンググループでは、技術の現状と開発課題について調査検討を行う。

○ 照射利用検討ワーキンググループ

上記のようにターゲット近傍では極めて多量の放射線とともに、ビーム径10mmφ以内に200kWという局所的に多量の熱が発生すること、しかもCW加速器であることから、従来のパルス型加速器に比べて恒常的な照射が可能である。本ワーキンググループでは、こうした高温・高放射線場での材料開発、熱除去系の開発等への開発利用について調査検討する。

○ 応用技術検討ワーキンググループ

近年、加速器を用いた自由電子レーザー（FEL）や低速陽電子による物性研究が注目されている。とりわけ、PNC加速器のように大出力の加速器では、高輝度のFEL開発が可能である。また、多量の制動X線からの電子・陽電子生成により高密度の陽電子が生成されることから、それらの物性研究への潜在的なニーズがある。本ワーキンググループでは、こうした加速器応用技術について調査し、原子力利用を中心に検討を進める。

3. 検討結果

各ワーキンググループでの検討結果を以下に示す。

3.1 計測技術

計測技術検討WGでは、PNC加速器を使った加速器の運転に伴って放出される放射線の計測手法、及び加速器の放射線を利用した計測手法について検討した。

加速器の放射線場は、一般に指向性が強く、またパルス場を形成することが特徴であるが、PNC加速器の場合はさらに、極めて高線量率の場が存在することが予測されている。そこで、これらの特徴を考慮し、下記の三テーマを選択し、検討した。

- ・大線量場の放射線計測技術の開発
- ・計測器校正場としての利用
- ・核反応断面積の測定

それぞれのテーマについて検討した結果を以下に示す。

3.1.1 大線量場の放射線計測技術の開発^{1), 2), 3), 4), 5), 6), 7)}

PNC加速器の場合、制動X線によりターゲットから1mの位置で $\sim 10^5$ Gy/hの γ 線吸収線量率が得られると試算される。これは原子炉の炉心の線量にも匹敵する極めて大きな線量率である。このレベルの線量率の測定には、既存の技術では化学線量計、ガラス線量計等が用いられてきた。しかし、これらはいわゆる積分型の線量計であり、オンラインのモニタリングには向かない。照射利用等での確かな評価を行おうとする場合、放射線場のオンライン計測は極めて有効であると考えられ、その技術の開発は、加速器や原子炉における照射技術の高度化に大きく資する。以下に、加速器放射線のオンライン計測に有効と思われるいくつかの手法を示す。

-放射線トリガ型レーザ

入射放射線によるレーザ発振電圧の変動を利用した放射線測定手法である。レーザ管電圧を放電開始電圧より低い、発振しない電圧に保ち、そこへ放射線を照射すると、二次電子等の荷電粒子が生成され、電子なだれを促進してレーザ発振を引き起こす。この時の発振開始電圧は放射線束に依存するため、放射線の計測器としての利用が期待できる。特にこの手法の場合、検出器本体がレーザ管であり構造が単純なこと、出力がレーザなので検出器出力を増幅せずに送れること、したがって、信号検出用電子回路を検出器から離しておけること等の利点がある。これらの利点から、放射線による検出系へのダメージを小さく抑えることができるため大線量放射線の計測への適用が期待できる。また、He-Neレーザを使った場合には、 ^3He が使われているため、 $^3\text{He}(n, p)$ 反応をトリガとして使った中性子測定も期待できる。

-光ファイバ

放射線計測で使われるものには大きく分けて、プラスチックファイバや石英ファイバ等の通常の光伝送ファイバを使うものと、ファイバ状のプラスチックシンチレータに被覆を施したものがある。

前者の一例としては、ファイバの一端にシンチレータ等の発光する検出器を接続し、検出器の出力を直接、遠隔地に容易に伝送できるようにしたものがある。検出器の体積をごく小さいものにすることによって、放射線場を乱さずに測定を行うことが可能である。また、光ファイバが放射線損傷を受けるとその点で光伝送効率が悪くなることを利用し、その劣化の程度から放射線束を測定する方法、あるいは損傷点で反射する光の到達時間を測定し、損傷位置すなわち放射線入射位置を同定する手法も開発されている。

後者はシンチレーションファイバと呼ばれるもので、最近、盛んに開発が行われている。一つのファイバとしては細いが、これらを組み合わせることによって、さまざまな形状の放射線検出システムを組むことができる。また、放射線の入射により発生したシンチレーション光のファイバの両端への到達時間を測定し、その時間差から放射線入射位置を測定する手法、さらにその計数率の分布から線量当量率の分布を測定する手法が開発されている。

光ファイバは、検出器の形状としての自由度が大きく、特に長尺の検出器を容易に組むことができること、耐放射線性が高いこと等から、加速管室内の放射線分布測定、あるいはビームロスモニタとしての使用も期待できる。

-ストリップライン型検出器

ストリップライン型検出器とは、二次元形状の放射線検出器を組み合わせ、放射線の入射位置を測定するものである。

精密測定に使われるものとしては、LSI技術を用い、シリコン基盤状に微細な帯状の半導体検出器を形成し、荷電粒子の入射位置を測定する。現在、加速器放射線の入射位置、エネルギー、入射時間計測手法として、盛んに開発が進められている。

また、ビームプロファイルモニタとして、多線式の計数管が用いられることがある。この手法はビームのプロファイルを、ビームに大きな影響を与えずに直接、リアルタイムに定量的に評価できるため、適用範囲が広い。また、出力回路の静電容量を小さくすることによって高時間分解能を持つ検出器とすることができる。

また、ビームの誘電起電力を利用してビームのプロファイルを測定する手法も開発されている。ビームを導体パイプの中に導き、パイプに誘起される電位によりビームのプロファイルを知る方法である。電位の測定点を増やすことによりビームの入射位置の測定も可能である。

-流体放射化システム

流体ターゲットを用い、ターゲットに含まれる物質の放射化量をオンラインで計測する手法である。国際熱核融合実験炉ITERの中性子プロファイルモニタとしての利用が検討されている。

また、PNC加速器の放射線場の計測における問題点として、制動X線と中性子線の混在、パルス場の線量計測の問題がある。ターゲット近傍の放射線場は、大量の制動X線の他、少量の中性子線も存在することが予想される。このような場での中性子計測手法は確立されておらず、今後の開発課題となっている。

また、パルス状の大線量放射線に対しては、検出器の反応時間の関係からの確な線量計測ができない可能性が示唆されている。これについても、今後の検討課題である。

3.1.2 計測器校正場としての利用⁶⁾

前項で、大線量放射線場の計測手法の開発について述べたが、この場は大線量放射線計測器の校正場としても利用できることが期待できる。

これまで大線量γ線の校正にはもっぱら原子炉、あるいは大強度RI線源による照射に頼ってきたが、絶対的な強度の不足等があり十分な評価を与えるのが困難である場合が多かった。PNC加速器の場合は、大強度放射線の照射を容易に行うことができ、大線量場での放射線測定器の挙動の確認を行うことができる。

また、大強度の中性子場となりうるが見込まれており、中性子線測定器の校正場として利用することも期待できる。

3.1.3 核反応断面積の測定^{8),9),10)}

大強度の制動X線を用いて、光核反応断面積の測定が期待できる。光核反応は放射性核種消滅処理手法の一つで、ソースが数10MeV程度までの電子線ですむことから、容易、かつ経済的に消滅処理を行うことができるものと期待されている。光核反応による消滅処理を行ううえで、その反応断面積を測定することは重要なステップであり、現在、TRU核種や⁹⁰Sr、¹³⁷Csの光核反応断面積の測定が行われている。

PNC加速器を用いた場合、制動X線による線量率が極めて高いことから、これらの光核反応断面積の測定が効率的に行うことができる他、これまで計測が事実上不可能であったμbオーダーの微小な核反応断面積を測定することも可能になるとと思われる。

一方、鉛集合体の中央部にパルス状高速中性子を打ち込むと中性子は弾性散乱を繰り返して減速する。高エネルギーの中性子はそれだけ速くエネルギーを失うため、エネルギーのfocus現象を起こし、50~100 keV以下の中性子になると、ほぼgauss分布に近いエネルギー分布を持つようになり、準単色の時間エネルギースペクトルが得られる。電子線

形加速器と組み合わせたこの種の鉛減速スペクトロメータは、中性子の減速時間（エネルギー）に対応した強力な中性子束が得られる（TOF法に比べ数千倍から1万倍）ことから、MA核種や長半減期FP核種の中性子に対する核反応断面積の測定に利用されている^{11), 12), 13)}。しかしながら、PNC加速器の電子ビームのパルス幅は、従来の研究用加速器と比べて極めて長いため、鉛減速スペクトロメータによる準単色中性子源を製作することは不可能である。よって、現在の仕様では、MA核種等の（n, f）反応断面積を求めることはできない。

3.2 照射利用

PNC加速器からは10MeV、平均20mAの電子線を取り出すことができる。また、ターゲットを選択することで 10^5 Gy/h程度の高強度のX線の発生が期待できる。また中性子については現在予測されている出力特性ではほとんど発生しない。そこで、PNC加速器から発生するこれら電子線およびX線の照射利用について調査検討した。

電子線ならびにX線の照射利用は各種計測機器における利用ならびに新規材料開発から医療、化学分野に至るまで多岐にわたり実用段階にあるものも多い。そこでPNC加速器より発生する電子線およびX線の照射利用法として、加速器を用いて発生させる電子線やX線であるという特長を活かすとともに、より先進的な分野での研究が期待される。

本ワーキンググループで検討した結果を表3.1に示す。調査に際しては先進性の高い分野の5項目について具体的に検討を行い、その他現在実用段階にある分野について合わせて項目のみをまとめた。

表3.1 照射利用検討項目

調査項目	線種
(1) 傾斜機能材料の開発	電子線
(2) 材料の表面改質の手法としての加速器の利用	電子線
(3) 電子線を利用した重合反応による核種の選択吸着材の開発	電子線
(4) X線 (γ線) によるステンレス鋼等の発熱断面積の測定	X線
(5) エンジニアリングダイヤモンドの開発	電子線
(6) その他の電子線, X線の利用法 (調査結果)	電子線 X線

3.2.1 傾斜機能材料の開発¹⁴⁾

[目的]

ステンレス鋼等の母材表面に異種材料 (Metal or Ceramics) を張り付け、その後電子線照射により拡散接合することで傾斜機能材料を作成する。

[期待される成果]

拡散接合を照射による方法と電気炉等を用いたアニーリングによる方法と比較すると、照射による方が接合温度を低くでき【注1】、また接合時間も短縮できる可能性がある。

そのためアニーリングにより強度が低下してしまう材料を母材に使用しても強度低下を伴わずに傾斜機能を付加できることが期待される。また接合時間が短縮できれば、多くの種類の研究用の試料が効率的に作成でき、材料開発に要する期間を短縮できる。加えて照射装置の構造次第で比較的大きな物も作製できる可能性がある。

【注1】 Arイオン及びSiイオンの室温照射により、500℃程度のアニーリングに相当する拡散係数が得られるという報告がある。

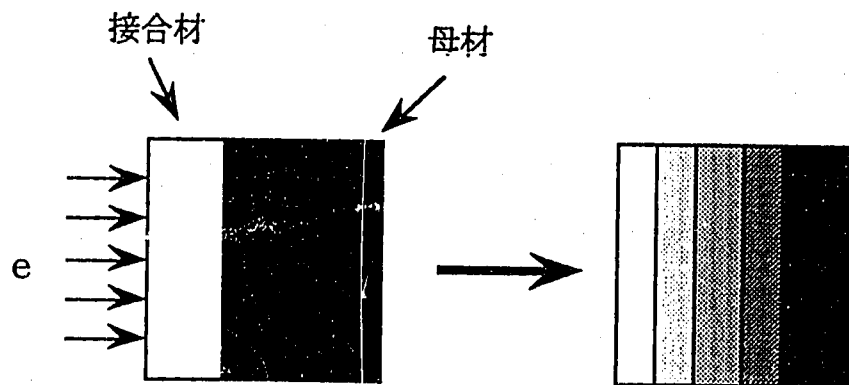


図3.1 傾斜材料作成の原理

3.2.2 材料の表面改質の手法としての加速器の利用^{15,16)}

[目的]

材料に電子線照射を施し表面近傍をアモルファス化することによる表面改質法の研究する。

[期待される成果]

同じ材料でも、その構造が結晶質の場合と非晶質の場合では種々の物性値が異なる。セラミクス材料の場合、アモルファス構造の方が靱性・耐摩耗性が高く、摺動部の部材として用いる際に表面層をアモルファス化することで材料の寿命の伸長が期待できる。

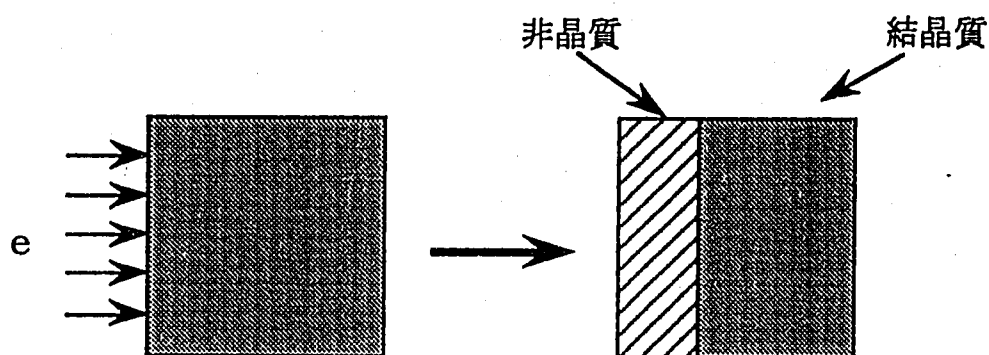


図3.2 アモルファス化による材料表面の改質

3.2.3 電子線を利用した重合反応による核種の選択的吸着材の開発¹⁷⁾

[目的]

高分子基材にアクリロニトリルを電子線によりグラフト重合【注2】させ、これを基材とし、官能基を交換することによって遷移金属、ウランや超ウラン金属を選択的に吸着できる機能性樹脂または機能性膜を開発する。

[期待される成果]

グラフト重合後の基材のシアノ基をアミドキシム基に変換すれば遷移金属やウランなどの選択的吸着ができることが知られており、海水からのウランの採取や廃液中の重金属の除去などへの応用が検討されている。

1. ウランや超ウラン元素またはFP等を選択できる樹脂または機能性膜などの開発
 - ・環境中のこれらの元素の分析を簡略化できる。
 - ・最処理の廃液処理系においてこれらの元素の除去が容易になる。
 - ・濃縮あるいは再処理の系において必要な元素の簡便な濃縮が可能になる。
2. 特定の重金属を選択的に吸着できる樹脂または機能性膜などの開発
 - ・一般の工場廃水中の重金属を容易に除去できる。
 - ・加速器による放射性核種の短半減期化を図る場合の前処理（核種の分離）に応用できる。

【注2】グラフト重合

幹となる高分子物質に異種モノマーを重合して枝として接ぎ木する方法

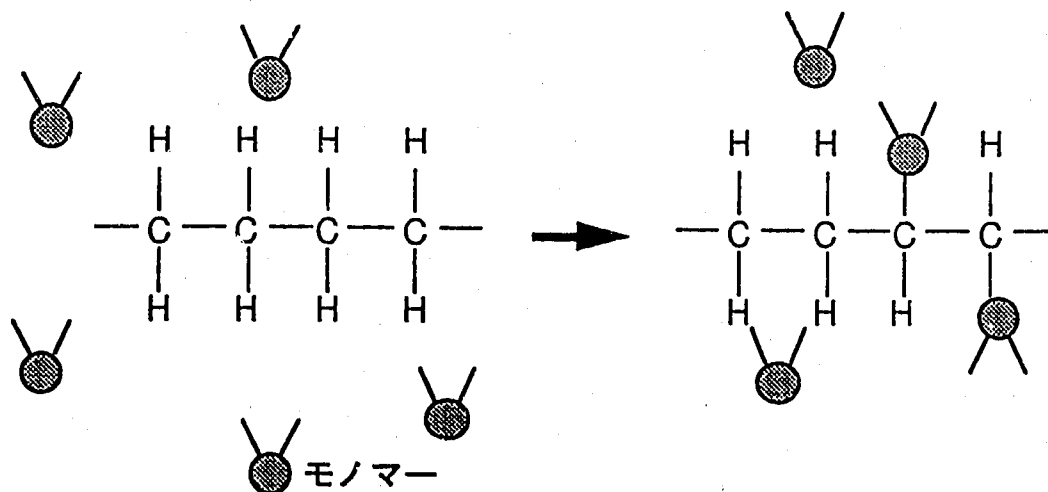


図3.3 グラフト重合

3.2.4 X線（ γ 線）によるステンレス鋼等の発熱断面積の測定¹⁸⁾

[目的]

原子炉による構造材料(ステンレス鋼)等の照射試験においては、照射試料の照射温度を精度良く目標温度に設定できることが要求される。

試料の温度は、試料の発熱量と冷却材による除熱量とのバランスによるが、試料がステンレス鋼の場合、その発熱は原子炉内の γ 線によるものであるため、発熱量の不確かさが大きいことから、試料の温度を目標値に設定することは困難を要する。

このため、原子炉においては考慮しなければならない中性子による発熱が無視でき、任意のエネルギー及び強度に設定できる加速器を利用し、X線（ γ 線）による発熱断面積の測定を行う。

なお、現在、 γ 線による発熱断面積がないわけではないが、その量及び質については十分でないと考えられる。

[期待される効果]

精度良く、発熱断面積という形で γ 線とステンレス鋼等の発熱を関係づければ、中性子による発熱と同様の計算手法で照射試料の発熱量を算出でき、簡単な熱計算のみで精度良く照射試料の温度設定が可能となるものと思われる。

3.2.5 エンジニアリングダイヤモンドの開発¹⁹⁾

[目的]

現在プラズマやレーザー等を利用した人工ダイヤモンドの合成が一部実用化されている。そこでPNC加速器から発生する電子線を利用したダイヤモンドの合製法を確立し、ダイヤモンドの工業利用法について検討する。

[期待される成果]

ダイヤモンドは1000℃以下においてあらゆる物質のなかで最も熱伝導率が優れ、不活性雰囲気において1500℃まで状態変化がない。この特性を利用しPNC加速器の熱除去系の材料をはじめとするヒートシンク材料としての利用に期待できる。

ダイヤモンドの優れた絶縁性と不純物固溶による半導体化、さらに放射線に強い特性を利用し、制御されたバルク材のダイヤモンドを合成する事でホット施設ならびにISI機器のLSIとしての利用が可能である。

またヤング率が他材料に比べ極端に高く優れた音響特性が得られるため、超音波またはアコースティックエミッション等の優れたセンサー機器の開発に利用できる。

さらに物質中で最も強度が高く、熱膨張率が最も低い性質を利用し、精密加工用ダイヤモンドバイトを開発することでナノメートルオーダーの超精密切削加工が可能であり、材料の表面加工ならびに精密な材料分析が可能となる。

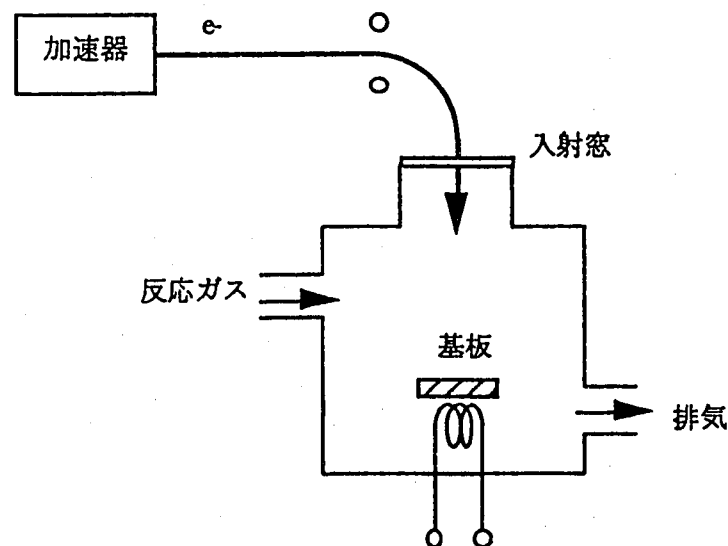


図3.4 ダイヤモンドの合製法

3.2.6 その他の電子線，X線の利用法（調査結果の一覧）

電子線ならびにX線（ γ 線）に対し，現在実用段階にある照射利用方法について文献調査した結果を分類し以下に示す。

○材料分野

- ・超高压電顕を用いたin-situシミュレーション照射（電子線）^{20) 21)}
- ・材料中への異種原子の強制注入及び異種材料のミキシング（電子線）
- ・材料のはじき出し損傷にともなうアモルファス相の形成および照射誘起結晶化（電子線）^{22) 23)}
- ・電子ビームによる溶接（電子線）
- ・電子ビームによる材料のアニーリング（電子線）^{24) 25)}
- ・電子ビームによるアモルファスの形成（電子線）
- ・X線CTによる欠陥検出（X線）^{26) 27)}
- ・残留応力の測定（X線）²⁸⁾
- ・表面解析，微小領域，軽元素の分析（X線）²⁹⁾

○工業・化学的利用¹⁷⁾

- ・高分子化合物の照射による橋架け，切断反応
- ・キュアリング（電子線）
- ・耐放射線材料の開発
- ・汚泥，排水処理（ γ 線，電子線）
- ・放射線滅菌（ γ 線）
- ・リソグラフィ（X線，電子線）

○生物利用¹⁷⁾

- ・放射線育種法（ γ 線）
- ・放射線照射食品（ γ 線）

3.3 応用技術

本ワーキンググループでは、PNC加速器から発生する10MeV・20mAの電子線を用いて始めて可能になる応用技術について検討調査した。

検討調査した結果を以下に示す。

- (1) FEL (自由電子レーザー)
- (2) 陽電子線の利用

3.3.1 自由電子レーザー

(1) はじめに

自由電子レーザー(FEL)は電子ビームが周期的に垂直方向の磁場中を通過する際、発生する電磁放射を増幅させる古典的原理による装置である。数百keV 数百MeVの電子により、波長可変、高効率の放射光源を動作させることができる。FELは軟X線からマイクロ波までの有望な放射光源となりつつある。FELの現在および将来の応用分野は高度化加速器、高度化レーダー、プラズマ加熱、医療及び物性研究、直接エネルギー変換等に及んでいる。

Langmuirの拡散真空ポンプの発明と酸化カソードの発見はDeForestの真空管制御格子との組み合わせにより、電子管工業の基礎を築いた。第2次世界大戦において開発された最も重要な技術はレーダーと近接信管である。これら二つの装置は自由電子源からのコヒーレント【注1】な電磁放射発生によっている。短波長放射の研究は1950年代後半にメーザーやレーザーが発明されてから量子電子工学により高められてきた。1960年代における磁気閉じ込め核融合はビームとプラズマの相互作用およびプラズマの不安定性に興味向けられた。集団的粒子運動のある種のプラズマ不安定性はFEL放射光源が遭遇する問題に類似している。

図3.2はFELの出力パワーとその波長を各種高出力コヒーレント放射光源(FEL、ジャイロトロン、通常マイクロ波管など)についてプロットしたものである。FELの動作範囲は単に全ての範囲をカバーしているだけでなく、最大出力も他の一般的な高出力コヒーレント源と同じレベルである。1951年Motzが磁石によるアンジュレーター【注2】を通過する電子により放射光が増幅できることを解析的に示した。彼が示した増幅のプロセスはFEL発生機構の理論的基礎となっている。Phillipsは1960年にこの発生機構によりマイクロ波が発生出来ることを最初に実証した。彼の装置(真空管)はubitronと呼ばれた。FELに対する興味はMadeyと彼の仲間によりFELが作られて、赤外領域のFELが1970年代後半に動作するに及んで再燃した³⁰⁾。

【注1】 周波数と位相の揃った波

【注2】 周期的な磁場などで電子を蛇行させて放射光を発生させる装置

(2) FEL発振原理

図3.5に示すように加速された電子ビームを周期的な磁場(アンジュレータ)で蛇行させるときに電子ビームの進行方向に放射光(自発放射光)が発生する。その光を反射率のよいミラーで往復反射させ、アンジュレータ内に入射してきた次の電子ビームと重畳させると、ある条件のもとでは電子のエネルギーを光が獲得し、光が増幅される。この増幅率がミラーの反射率による光の減衰を上回っていれば光増幅の繰り返しにより、アンジュレータによる光に比べて高出力なコヒーレントな光が発生する。これがFELの発振である。自発放射光の中心軸上に見いだされる波長 λ は、

$$\lambda = \lambda_w (1 + K^2/2) 2\gamma^2 \dots \dots \dots (3.1)$$

で表される。またFELの増幅率 G_M (利得、ゲイン)は、簡単には次式で表せる³⁾

$$G_M = 1.5 \times 10^{-14} \lambda_w^2 M^3 K^2 \gamma^{-3} [JJ]^2 f_0 \rho F_t \dots \dots \dots (3.2)$$

$$K = 93.4 B \lambda_w$$

$$[JJ] = [J_1(\epsilon) - J_0(\epsilon)]$$

$$\epsilon = K^2 / (4 + 2K^2)$$

$$F_t = \{ [1 + (\omega_0 / (2\sigma_x))]^2 [1 + (\omega_0 / (2\sigma_y))]^2 \}^{-0.5}$$

ここで λ_w は磁場周期長、 M は周期数、 B はピークの磁場強度、 γ は電子エネルギーを電子の静止質量で割ったもの、 J_1 、 J_2 はベッセル関数、 f_0 は利得の劣化係数、 ρ は電子密度、 ω_0 はレーザービームのウエストサイズ、そして σ_x 、 σ_y はx、yそれぞれの方向のビームサイズである。

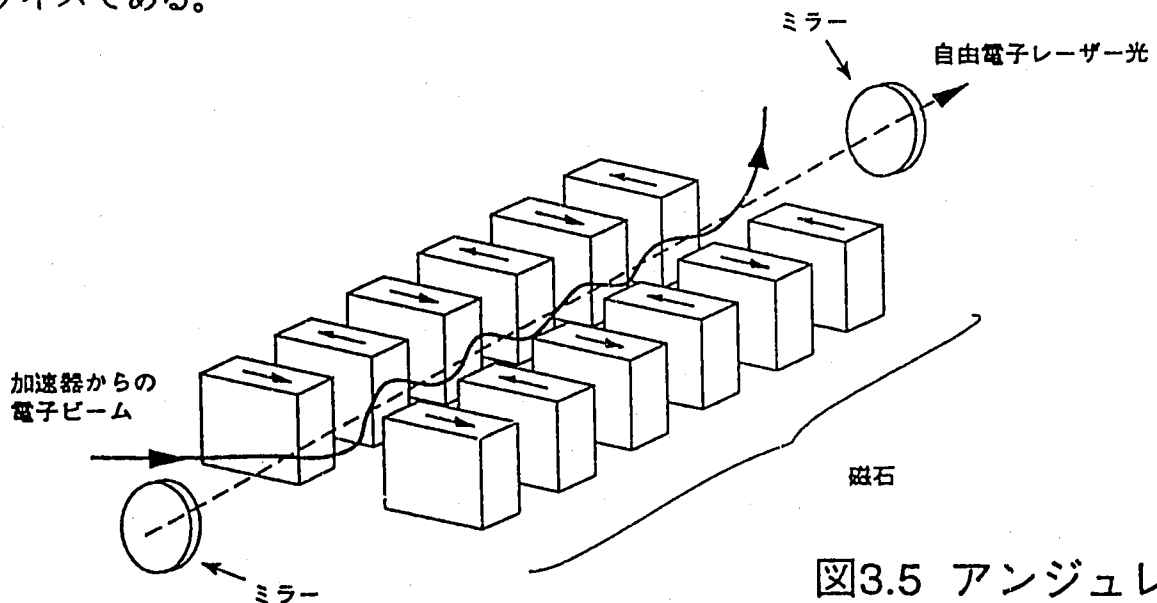


図3.5 アンジュレータ

(3) FELの特徴

a)広帯域発振

マイクロ波からX線領域までの発振が原理的には可能である。

但し、X線領域の発振は研究段階である。

b)波長可変 (波長選択性)

従来のレーザーはガスの種類によって発振波長が決ってしまうが、自由電子を用いるため任意の波長を発振できる。

c)高出力

ガスを用いないため効率良く高出力が得られ、極短パルス光も得られる。

d)単色性

光発振器を用いる誘導放射の原理で発振させるので、選択した波長の光が得られる。

e)コヒーレンス

時間、空間的に位相がそろった光が得られる。

f)高効率、安定

ガス劣化が無いので、高効率で安定した連続発振が可能である。

このように波長可変、高出力、高効率である自由電子レーザーは開発が始まったばかりであり、過去10年間は発振証明のための実験がほとんどで、越えなければならない障壁はたくさんある。

(4) 現状

自由電子レーザーが強力に発振するには、輝度が高くエミッタンスが十分に小さい高品位電子ビームが不可欠で、これを得るには現代技術の粋を集めた高性能加速器が必要である。また、波長を短くし、高出力の光を得るためには、高エネルギーでエネルギーの広がり狭い安定した電子ビームが必要である。

このように高性能大出力線形加速器は、高出力高効率レーザー光を発振する潜在的なポテンシャルがある。特にPNC加速器では、波長100 μm 近傍のレーザー光を得ることが可能であり、現在開発を行なっているFELの発振波長領域ではユニークな領域に属する (表3.2参照)。(発振する波長領域は、電子ビームのエネルギーとアンジュレータ周期によるので、加速器の種類に大きく依存する)

表3.2 自由電子レーザー開発の状況

研究機関	発振波長(μm)	発振年	特記事項
スタンフォード大	3.5	1977	世界初
カリフォルニア大	200~800	1985	ユーザに提供
ボーイング	0.5	1987	現在最大出力 (1GW)
VEPP3 (露)	0.25~0.65	1988	現在最短波長
デューク大	0.01~0.5	建設中	同位体分離
阪大	1000	1988	
電総研	0.585	1991	
分子研	0.488	試験中	
原研	10~50	建設中	
動燃	100	---	---

(5) 期待される成果

発振したレーザー光についての応用を考えると、発振波長 $100\mu\text{m}$ 近傍(遠赤外光)で応用可能な技術として遠赤外分光(超電導体のメカニズム、金属微粒子の電子状態の解明、フォノン系の励起、生体関係(DNA解析など)は波長が長すぎて難しい)への応用が考えられるが、これらは分光への利用で高輝度の光源は必要とするものの大出力は必要とされない。しかるに高効率の大出力の光源として工業的利用を考えるにはこの波長領域の利用を考えるのではなく、より高い電子エネルギーの大電力加速器によるFEL開発の要素開発用加速器として利用すべきである。その上で、赤外、可視光領域の高効率のレーザとして同位体分離などポテンシャルのある利用が考えられる。

(6) まとめ

PNC加速器において高品位で安定した電子ビームが得られるならば、高出力高効率なFEL光を得る可能性がある。特に、波長 $100\mu\text{m}$ 近傍のレーザ光が得られ、現在開発を行っている自由電子レーザーの発振波長領域ではユニークな領域に属する。平均出力を考慮した応用技術、大電力FEL開発の要素開発用加速器などを目的とすればPNC加速器の特徴が出せると思われる。

3.3.2 陽電子線の利用

電子の反粒子である陽電子が物性研究のためのプローブとして使われ始めたのは1950年代のことである。これ以降陽電子は、主として電子-陽電子対消滅という現象を利用して、金属のフェルミ面などの電子構造や格子欠陥の研究などに威力を発揮してきた。

近年になって、陽電子が正電荷をもつ軽粒子であるという特性を巧みに利用して、これを単色ビームとして取り出し、更に高輝度化する技術が開発されてきた。これによって全く新しい「陽電子分光学」が開拓されつつある。PNC加速器から得られる大強度電子ビームによって新しい陽電子ビームの応用技術が期待できる。

本節では、PNC加速器から生成される大強度単色陽電子ビームの強度等を調べ、その応用についてまとめる。

(1) 陽電子ビームの発生方法の現状

本節では既の実績のある陽電子ビームの発生方法についてまとめる。

(i) 陽電子放出核種の直接的利用

陽電子放出核種から放出される陽電子のエネルギーは、0～数百 keV ないし MeV まで分布(白色陽電子線)しているが、この陽電子線をそのまま利用する。物質中に打ち込まれた陽電子は固体中では 10^{-10} 秒程度で熱化したのち、電子と対消滅する確率が圧倒的に高いので、消滅 γ 線を検出する限り媒質と平衡にある熱エネルギー(室温で ~ 25 meV)の単色化された陽電子の事象を観測していることになる。しかし消滅位置を限定することが出来ないので、得られる情報は物質内部のバルクの情報である。

陽電子放出核種として、イオン加速器あるいは原子炉の照射で得られた陽電子放出核種を同位体分離、濃縮したものを利用する。例えば、 ^{22}Na は NaCl の水溶液の形で入手出来るので、マイラなどの薄膜間に層状に蒸発乾固して、封入し線源とする。また、白金ディスク上に 0.25 mm 程度の厚さに ^{22}Na の層を着け、5 μm 厚のチタン窓で覆った線源が市販されている。

(ii) 単色陽電子ビームの発生方法

エネルギー分布を持った陽電子線でも、物質中で消滅する以前に熱エネルギーに単色化されている。これを消滅前に外部に取り出せば単色のビームが得られる。そのためには、なるべく表面近傍で熱化するように減速能が大きく、熱化したのち拡散で表面近傍に来るまでの間に消滅してしまう割合が少ないように拡散距離の大きい材料が必要である。さらに、表面に戻ってきた陽電子を物質外に押し出すように、陽電子に対する表面仕事関数がマイナスの値を持つことが必要である。

単結晶のタングステンなどは上記の条件を満たす物質で、モデレーターと呼ばれている。また、このような物質表面での再放出過程で得られる陽電子のエネルギーは、表面仕事関数の絶対値($\sim eV$)程度にそろっており低速陽電子と呼ばれている。これを適宜加速することによりエネルギー可変の単色陽電子ビームが得られる。

但し、通常の放射性物質からの白色陽電子線にタングステンモデレーターを適用すると、低速陽電子ビームへの変換効率は 5×10^{-4} 程度で、この変換効率の低さを補うためには、大強度白色陽電子線を発生する必要がある。この発生方法は下記の方法がある。

① RI線源の利用

最も一般的な方法は、市販されている数量の大きな陽電子線源を利用する方法である。(i)で示したチタン薄膜で被覆した層状の ^{22}Na などが用いられている。低速陽電子ビーム強度は、最大 10^6 個/秒である。

② 電子加速器の利用

大強度の低速陽電子ビームを得るために世界各国で行われている方法のうち、これまでに最も実績のあるものは、電子加速器を用いる方法である。

高エネルギー電子をタンタルなど重金属のコンバーターに入射し、制動放射と対生成のカスケードシャワーを発生させることにより白色陽電子線を得ている。

世界最大の低速陽電子ビーム強度は、米国・オークリッジ国立研究所の150 MeV電子加速器(ORELA)³²⁾で達成された。33 kW運転時に 1.1×10^8 個/秒の単色陽電子ビーム($\sim 3 keV$)を得た。

また、国内最大の低速陽電子ビーム強度は、日本原子力研究所東海研究所の100 MeV・1 kW電子加速器を用いて 3×10^7 個/秒の強度を得た³³⁾。尚、この施設は1993年秋に閉鎖された。

種々の実験データ^{32,34~38)}をもとに低速陽電子の発生効率(モデレーターから再放出される低速陽電子数/コンバーターに入射する電子数)と電子ビームエネルギーの関係を表すと図 3.7 のようになる。図 3.7 に示した×印は、薄板を平行に並べた羽根板状(VANE)のモデレーターを用いて、発生した低速陽電子を電子ビームに対して垂直方向に引き出す方法を採用している(図 3.8 参照)。また、□印はVANE 状モデレーターを用いて、発生した低速陽電子を電子ビームに対して平行に引き出す方法を採用している(図 3.9 参照)。

低速陽電子の発生方法として主流であるVANE 状モデレーター+垂直方向引き出し(図 3.7 ×印)を用いた場合、その発生効率 η は入射電子エネルギー E の関数として(3.3)式で表される。

$$\eta = 4.7 \times 10^{-10} (E / 7.8)^{2.9} \quad (3.3)$$

(2) 陽電子が利用される研究分野の現状と今後の展望

本節では陽電子のビームとしての利用形態として、打込み深さ制御と表面相互作用を中心に、その現状と展望についてまとめる。

(i) 打込み深さ制御

数 eV 程度の低速陽電子ビームをそのまま、あるいは適宜加速しエネルギーを制御して固体に打込むことにより、打込み深さを最表面から内部まで変えることができる。市販の RI 線源を利用したエネルギー可変単色陽電子ビーム(最大 50 keV 程度)で半導体などの格子欠陥の解析が行われている。

特に、低速陽電子ビームをパルス化して陽電子の消滅寿命を測定し、格子種に関してより詳細な情報を得る研究も行われている。ドイツ・ミュンヘン大学では RI 線源を利用した低速陽電子をパルス化して 135 ps の時間分解能を得ている³⁹⁾。これらの方法によれば任意の深さにおける情報が得られるだけでなく、通常の方法と比較してはるかに高い計測効率が得られる。

陽電子が試料を通過するほど陽電子ビームのエネルギーを高くすると、負の電荷を持つ電子に比べて陽電子は原子核場へのからみつきが少なく直進性が高くなる。このため、加速した陽電子ビームを結晶軸や結晶面に平行に入射したとき陽電子ビームと似たようなチャネリングを起こすことを確認している⁴⁰⁾。

また、高エネルギー陽電子の持つ高透過性、高直進性を期待して透過型陽電子顕微鏡の開発が行われている。

(ii) 表面相互作用

固体表面の電子分光における電子を陽電子に置き換えた場合、正電荷を持った軽粒子である特質から、より表面に敏感で精密な情報が得られる。また、陽電子に特有な再放出過程なども表面状態を調べるのに有効である。

これらの特徴を利用した陽電子分光として下記の応用が開発されている。

- ① LEPS (低速陽電子回折)
- ② PAES (陽電子誘起オージェ電子分光)
- ③ 再放出陽電子エネルギー分光
- ④ RPM (再放出陽電子顕微鏡)
- ⑤ ポジトロニウム回折
- ⑥ ポジトロニウム形成分光

上記実験の多くは、RI線源からの陽電子を利用して行われており、特に回折や顕微鏡の実験では輝度強化の過程を経るので、試料に到達する低速陽電子ビーム強度は 10^4 個/秒台である。このため測定に時間がかかり過ぎることとS/N比の問題が指摘されている。例えば、陽電子回折の結果を電子線回折の結果と比較して新しい情報を得るためには、電子と同じ条件で測定することが望ましい。そのためには \sim nA ($\sim 6 \times 10^9$ 個/秒)の低速陽電子ビーム強度が必要になる。

(3) PNC 加速器から得られる陽電子ビーム強度

本節ではPNC加速器から得られる低速陽電子ビーム強度の試算を行い、大強度陽電子ビームを得るために解決しなければならない課題について述べる。以下の試算では、生成した低速陽電子ビームを加速する効率は考慮していない。

(i) 陽電子ビーム強度

高エネルギー電子からの陽電子生成効率を電磁カスケードモンテカルロ計算コード⁴⁰⁾ EGS 4 を用いて計算を行った。コンバーターの材質として厚さ0.5放射長のタンタルを用いた。図3.10にコンバーターから放出する陽電子のエネルギー分布をその放出角をパラメーターとして表した。

低速陽電子源として現在主流であるVANE状モデレーター+垂直方向引き出し方法を採用すると、低エネルギーの陽電子がコンバーター前方に放出される割合を求めなければならない。図3.10から陽電子放出角が20度以内の陽電子生成効率 ϵ は、 $\epsilon = 2 \times 10^{-4}$ となる。但し、陽電子のエネルギーを4 MeV以下とする。

また、モデレーターでの低速陽電子の生成効率 μ を一般的なモデレーターの生成効率 2×10^{-6} と仮定すると、PNC 加速器から得られる低速陽電子強度 N^+ は、(3.4)式で表される。

$$\begin{aligned} N^+ &= \epsilon \mu N^- & (3.4) \\ &= 2 \times 10^4 \times 2 \times 10^{-6} \times 1.3 \times 10^{17} \\ &= 5.2 \times 10^7 \text{ (個/秒)} \end{aligned}$$

ここで、 N^- は入射電子数 (20 mA) を表す。

また、(3.3)式から得られる低速陽電子の発生効率 η は、PNC 加速器の場合 9.7×10^{-10} となり、(3.4)式から得られる効率 4×10^{-10} とほぼ一致した。

従って、PNC 加速器から得られる低速陽電子ビーム強度として、 $(0.5 \sim 1) \times 10^8$ (個/秒)となる。

(ii) 低速陽電子ビーム生成に関する課題

前項 (i) で求めた陽電子ビーム強度を得るために、最大の課題はコンバーター部分の除熱の問題である。EGS 4 の計算から 10 MeV・200 kW 電子ビームがタンタル板に入射した場合、最高 3000 kW/cc の発熱が予想され、その温度は 10 万度以上になる (但し、ビーム径を 5 mm とする)。タンタルの融点を考えると、入射電子電力を 0.5 kW 程度に抑えることにより最高温度は約 1000 度となる。

従って、大強度陽電子ビームを生成するためには、薄板にビームを照射する従来の方式と異なる方式によってコンバーター部分の除熱を効率良く行わなければならない。例えば、コンバーターを回転する方法や鉛-ビスマス等の液体金属を用いる方法が考えられる。

次にコンバーター部分の形状と密接に関係するモデレーターに関して、効率良く低速陽電子を集めるモデレーターの形状を検討しなければならない。図 3.9 に示したように低速陽電子を平行に引き出す方法などについて検討を行う必要がある。

(4) まとめ

加速器を用いた陽電子線ビームの応用技術は、現在得られている電流値が高々 10^{-4} nA (10^5 個/秒) 程度のため、電子線の場合と比較すると「未開発」と言っても過言ではない。

PNC 加速器を用いて得られる陽電子ビームの強度は、0.02 nA (1×10^8 個/秒) 程度と予想され、従来の陽電子ビーム強度の約 200 倍となる。

しかし、この陽電子ビームを発生させるためには、コンバーター部分の除熱・高効率モデレーターの開発等の課題が山積している。従って、これらの課題を解決しなければならぬが、PNC 加速器は大強度陽電子ビームを発生することが可能であり、陽電子ビームの応用技術の発展に十分寄与できると思われる。

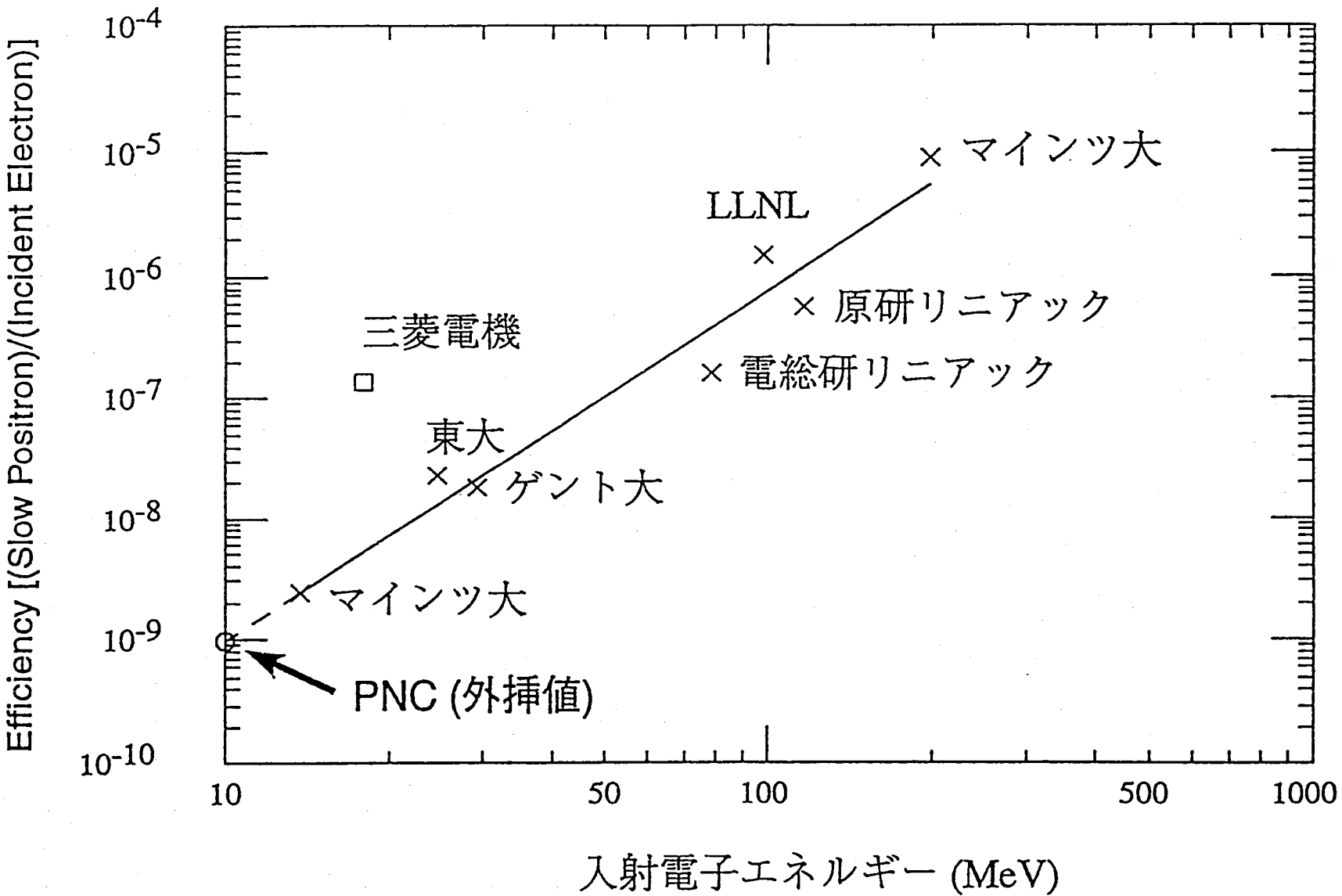


図3.7 低速陽電子発生効率

14 MeV Electron
入射電子電力 210 W
生成効率 2.3×10^{-9}

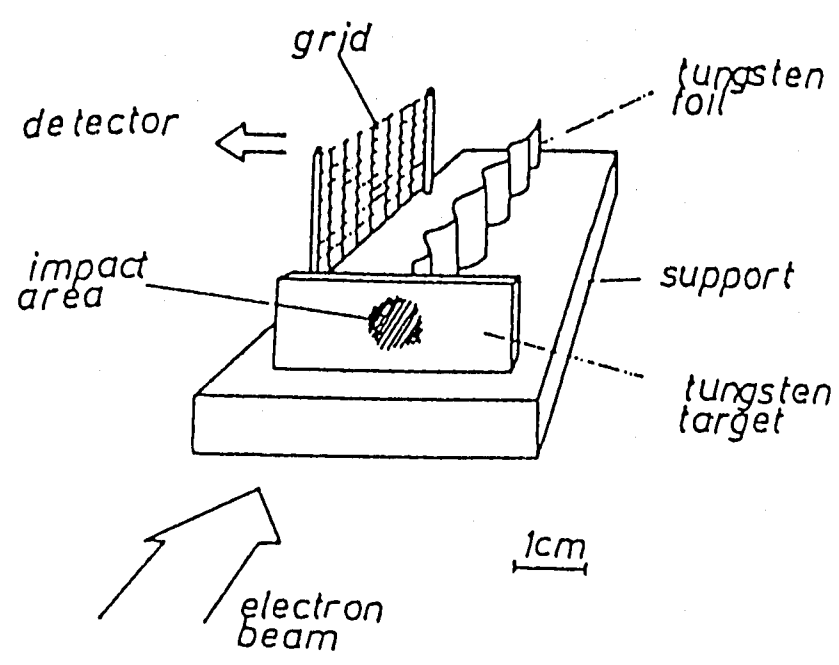
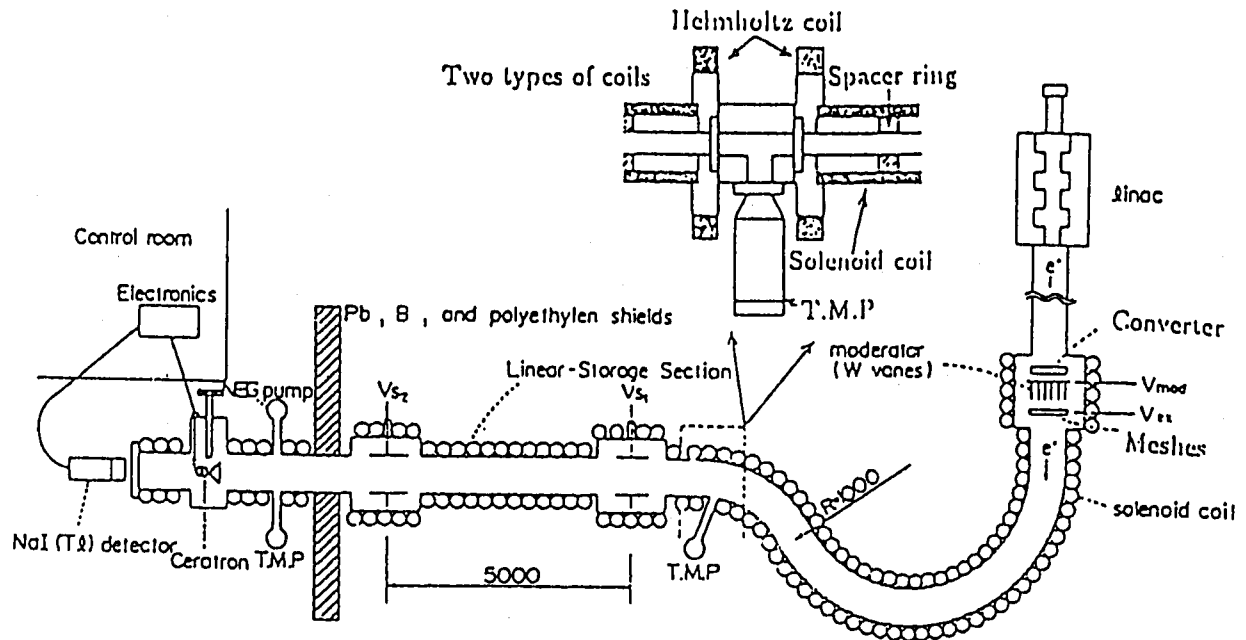
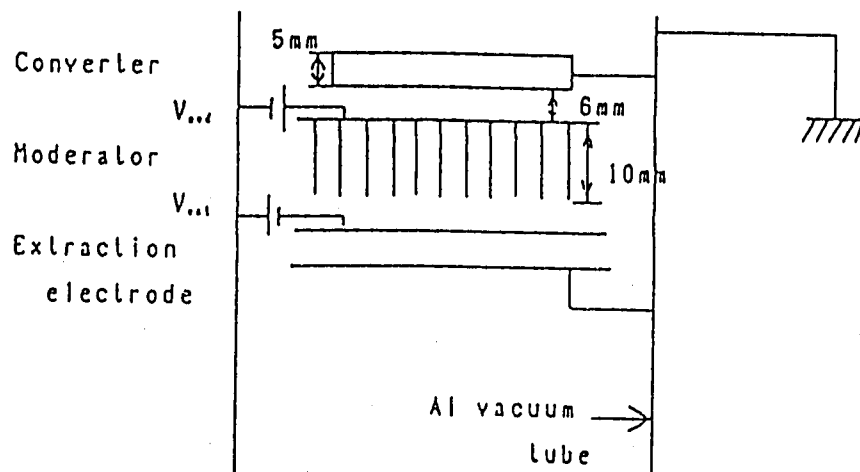


図3.8 マイツ大低速陽電子源

18 MeV Electron
 入射電子電力 16.2 W
 生成効率 1.35×10^{-7}



陽電子源の配置



陽電子源の電位配置

図3.9 三菱電気(株)低速陽電子源

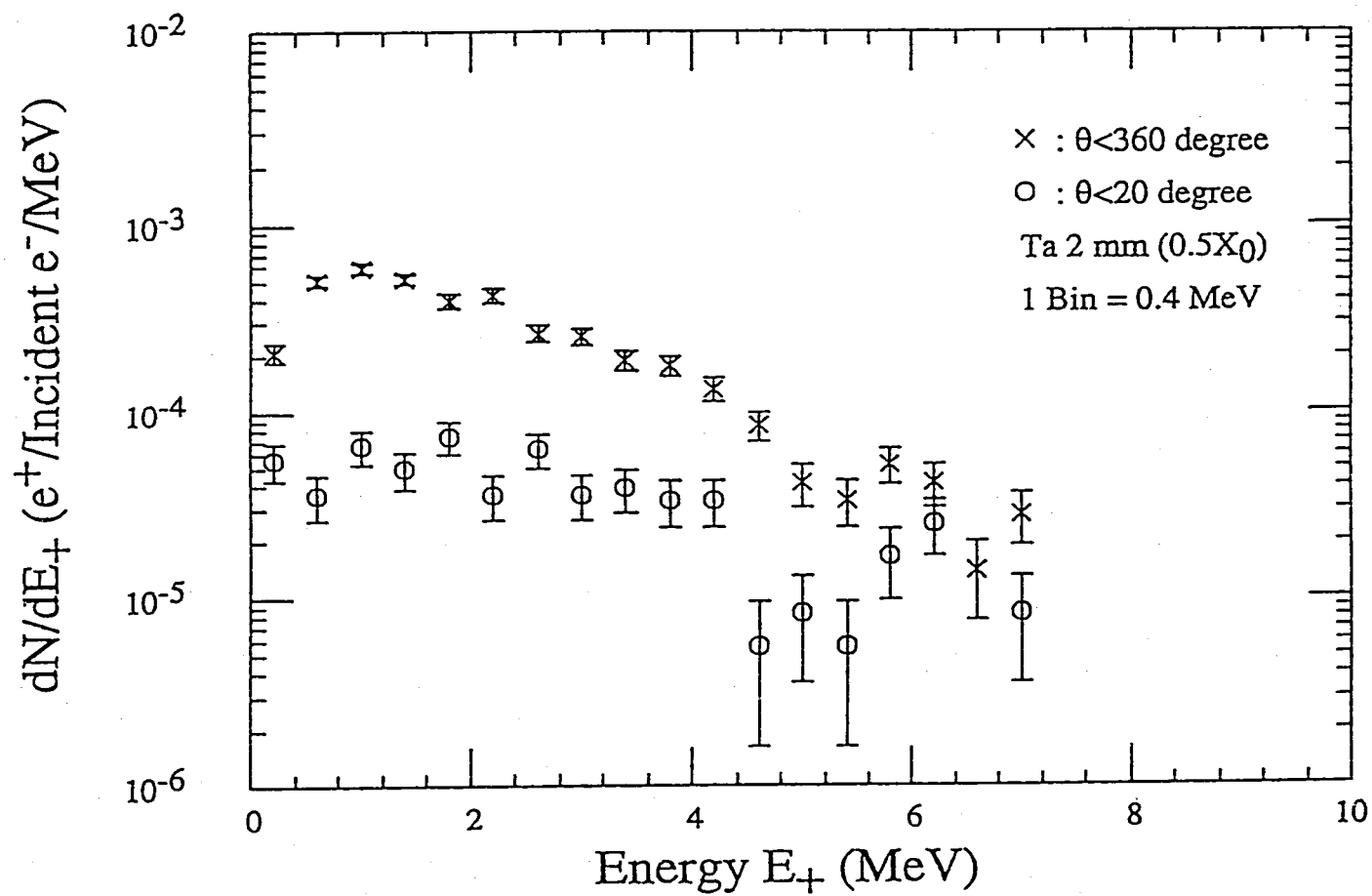


図3.10 陽電子のエネルギー分布 (10MeV 5 ϕ)

4. まとめ

- (1) PNC加速器は、加速エネルギー10 MeV、最大/平均電流100 mA/20 mAという大強度の電子線形加速器であり、消滅処理研究以外にもその特徴を生かして陽電子生成、自由電子レーザー、各種強力照射源等としての利用の可能性がある。
- (2) 自由電子レーザー (FEL) については、波長100 μm 近傍 (遠赤外光) のレーザー光を得ることが可能である。現在開発が行われているFELの発振波長領域ではユニークな領域に属し、具体的な用途は少ないものの、大電力FEL要素開発に資することができよう。
- (3) 電子加速器を用いた陽電子ビームの利用として、低速陽電子回折、分光等の材料分析等が考えられる。PNC加速器は、従来の陽電子ビームに比べて約200倍の強度となり得るため、分析の効率化が望めるが、コンバータ部分での発熱がクリティカルとなる。このため、除熱系の開発が不可欠である。
- (4) 材料照射への利用としては、放射線 (電子、 γ 線等) の利用と熱の利用が考えられる。本検討会では、主に電子及びX線の利用について検討した。その結果、傾斜機能材料の開発等、従来の工業用加速器を用いた開発、利用法が多かった。工業用加速器に比べてPNC加速器は極めて大強度であるため、これらの開発、利用が短時間でできるものと考えられる。
- (5) PNC加速器は、法的にみると大強度の「放射線発生装置」であり、これを用いた計測法の開発フィールドとしての利用が考えられる。ターゲット近傍では、炉心レベルのX線が発生するにもかかわらず、アクセスが容易であるため、照射損傷の評価、及び放射線計測手法の開発が比較的容易となる。特に、SERAPHの物質移動計装等、大線量場での時間、位置について高分解能が要求されるフィールドでの計測技術の開発に資することができよう。また、原子炉に比べて発生できる中性子のエネルギーがやや高いため、核融合研究等にも資することが可能である。
- (6) 電子加速器は陽子加速器等に比べて放射線的にクリーン (2次放射線が少ない) であるため、ターゲット系を考慮すれば大強度の中性子源としての利用が考えられる。とりわけ、重水素やリチウム等のしきい値エネルギーの低い物質をターゲットとして用いることにより $\sim 10^{14}$ n/secの大強度中性子源を開発することも可能である。

5. 参考文献

- 1) 中沢正治ほか:新しい放射線センシング技術を求めて、日本原子力学会誌、Vol. 32、No.3 (1990)
- 2) 原子力における次世代計測技術調査専門委員会編:放射線の次世代計測技術の展望、電気学界技術報告 (II 部)、第337号(1990)
- 3) 量子工学的放射線計測手法調査委員会編:放射線計測の量子工学的手法に関する調査研究、PNC PJ1545 92-004
- 4) 中沢正治ほか:放射線応用技術ハンドブック、朝倉書店、(1990)
- 5) (財)放射線照射振興協会編:工業照射用の電子線量計測、地人書館、(1990)
- 6) 江本武彦ほか:放射線位置検出器の調査と特性試験、PNC ZN9410 93-186(1993)
- 7) 中沢正治ほか:放射線の空間分布測定手法に関する研究 (II)、PNC PJ1607 94-002(1994)
- 8) 中村尚司ほか:超ウラン元素を含む放射性廃棄物の光分解消滅のための基礎研究(III)、PNC J4601 89-001
- 9) 中村尚司ほか:超ウラン元素を含む放射性廃棄物の光分解消滅のための基礎研究(IV)、PNC J1601 90-001
- 10) 中村尚司ほか:超ウラン元素を含む放射性廃棄物の光分解消滅のための基礎研究(V)、PNC PJ1601 91-003
- 11) R. E. Slovacek, et al., Nucl. Sci. Eng., 62, 455 (1977)
- 12) H. T. Maguire, Jr. et al., Nucl. Sci. Eng., 82, 293 (1985)
- 13) 小林捷平ほか:電子線形加速器と組み合わせた鉛減速スペクトロメータの特性とこれを用いた²³⁷Np (n,f) 反応断面積の測定、京大炉第27回学術講演会報文集 (1993)
- 14) 高エネルギー電子線を使った異種原子の recoil implantation とそのセラミクスへの応用、森博太郎 (阪大 超高压電子顕微鏡センター) 他, 粉体粉末冶金協会大会講演概要集; Vol.1987 No.Autumn 1 p.152-153 (1987), JICST No. 88A0491414
- 15) Ion implantation and related treatments applied in tribology., Deamaley G (AERE Harwell; England), NATO ASI Ser. E; No.85 p.125-147 (1984), JICST No. 85A0139114
- 16) イオンおよび電子線照射によるニッケル/チタン薄膜表面の改質, 大貫惣明 (北大工) 他, 北海道大学工学部研究報告; No.132 p.173-183 (1986), JICST No.87A0026943
- 17) 放射線応用技術ハンドブック, 山口彦之他 編集, 1990
- 18) 「常陽」照射技術高度化基本計画の検討 (回議中)
- 19) ダイヤモンドの合成技術とその応用・例, 松本修他, 応用技術出版, 1987

- 20) Investigation of in-situ radiation damage to glass in electron microscope, DeNatale J (Univ. California at Davis) et al., Proc. Annu. Conf. Microbeam Anal. Soc. ; Vol.16th p.273-275 (1981), JICST No. 82A0445651
- 21) In-situ Observation of Structural Damage in SiC Crystals Induced by Hydrogen Ion, Irradiation and Successive Electron Irradiation, Hojou K (JAERI ; Ibaraki ; JAN) et al., J. Electron Microsc. ; Vol.40 No.3 p.157-161 (1991), JICST No. 91A0690791
- 22) Electron-beam-induced "explosive" crystallization of amorphous $\text{Se}_{80}\text{Te}_{20}$ alloy thin films and oriented growth of crystallites, Das VD (Indian Inst. Technology ; Madras ; IND) et al., Phys. Rev. B ; Vol.37 No.2 p.720-726 (1988), JICST No. 88A0273784
- 23) Electron-irradiation-induced gold atom implantation into silicon carbide, Mori H (Osaka Univ. ; Osaka ; Japan), Radiat. Eff. Defect Solid ; Vol.124 No.1 p.51-59 (1992), JICST No. 92A0466302
- 24) Electron Beam annealing for phosphorous and arsenic implantation, Zheng L (Shantou Univ. ; CHN) et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B ; Vol. 6 No.1/2 p.321-324 (1985), JICST No. 85A0363679
- 25) Metastable alloy formation in electron beam pulsed Al and Si, Picraux S (Sandia National Lab. ; NM), Laser Electron-Beam Solid Interact Mater Process ; p.575-582 (1981), JICST No. 82A0008187
- 26) 科学技術最先端シリーズ 19 CT技術とその産業分野への応用, 出海滋, 日本原子力学会誌 Vol.32 No.11 p.1092-1094, 1990, 91A0108036
- 27) Cross-Sectional imaging of large and dense materials by high energy X-ray CT using linear accelerator, KANAMORI (Hitachi Ltd) et al., J Nucl Sci Technol Vol.26 No.9 p.826-832, 1989, JICST No. 89A0555976
- 28) セラミックスと金属との複合材料の評価技術に関する研究 (中小企業庁S), 鹿田順生 (機械技研) 他, セラミックスと金属との複合材料の評価技術に関する研究 平成1年度, 1990, JICST No. 91A0066048
- 29) Greater precision materials analysis, BITTENCE J C, Adv Mater Processes, Vol.136 No.5 p.11-16 18-19, 1989, JICST No. 90A0082144
- 30) C. W. Roberson, AIP Conference Proceedings "A Review of Free-Electron Lasers" 912 (1992)
- 31) D. A. G. Deacon et al., Appl. Phys. B34, 207 (1984)
- 32) L. D. Hulet et al., Proc. 8th Int. Conf. Positron Annihilation, World Scientific,
- 33) Y. Ito et al., Nucl. Instr. Meth. A305, 269 (1991)
- 34) M. Begemann et al., Nucl. Instr. Meth. 201, 287 (1982)
- 35) R. H. Howell et al., Appl. Phys. Lett. 40, 751 (1982)

- 36) G. Graff et al., Appl. Phys. A33, 59 (1984)
- 37) O. Sueoka et al., Jpn. J. Appl. Phys. 24, 222 (1985)
- 38) M. Dorikens et al., Appl. Phys. A43, 257 (1987)
- 39) D. Schodlbauer et al., Nucl. Instr. Meth. B34, 258 (1988)
- 40) J. U. Andersen et al., Phys. Rev. B3, 705 (1971)
- 41) W. R. Nelson et al., "EGS4 Code System", SLAC-265, (1985)

付録 1

PNC加速器の特徴と放射線

Transmutation of Fission Products

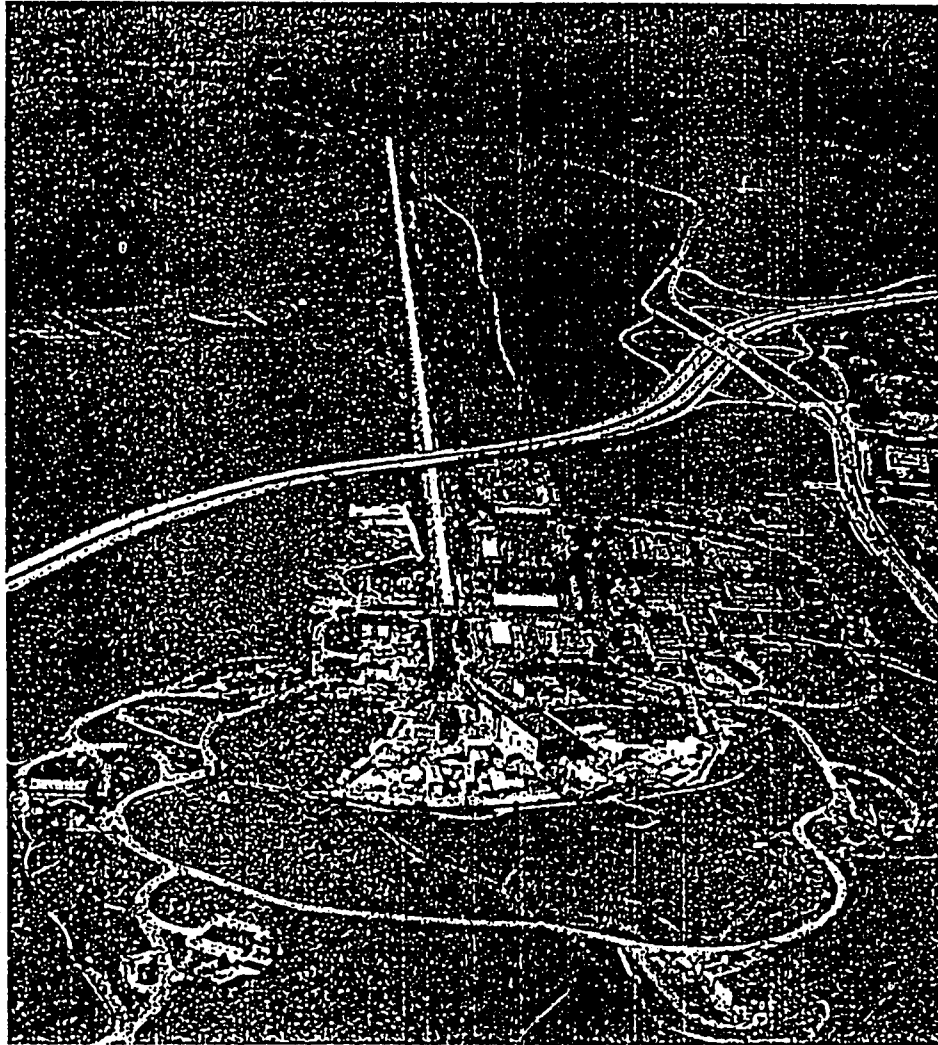
Nuclides

- Long Life
- Large Fission Yield
- Small Neutron Capture Cross Section

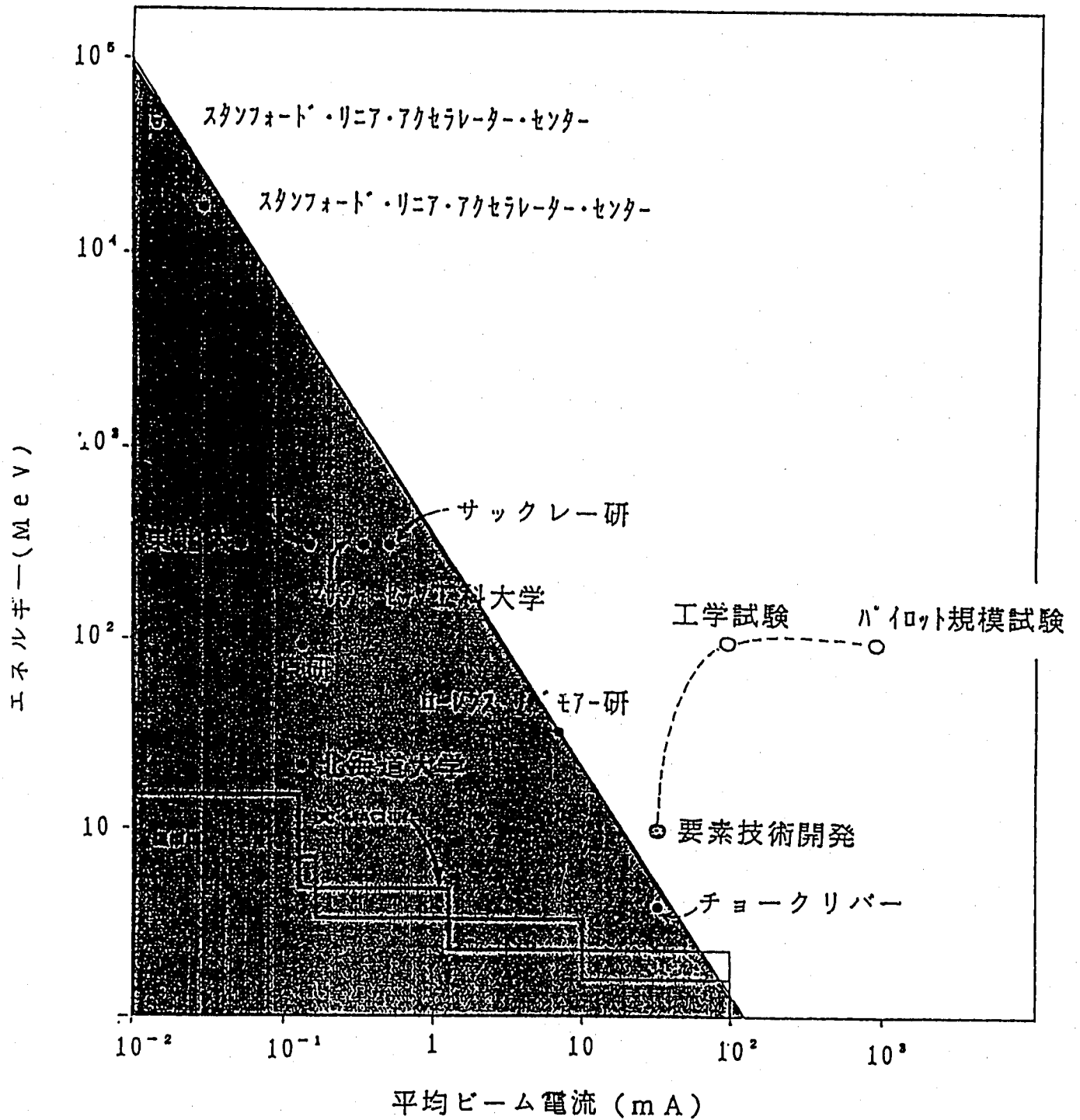
nuclide	half life (y)	fission yield (%)	(n, γ) cross section
^{85}Kr	11	0.3	1.7b
^{90}Sr	29	5.9	14mb
^{93}Zr	1.5×10^6	6.4	1.3-4b
^{99}Tc	2.1×10^5	6.1	20b
^{107}Pd	6.5×10^6	0.2	1.8b
^{129}I	2.3×10^6	6.7	8.7b
^{137}Cs	30	6.2	0.25b

Stanford Linear Accelerator Center

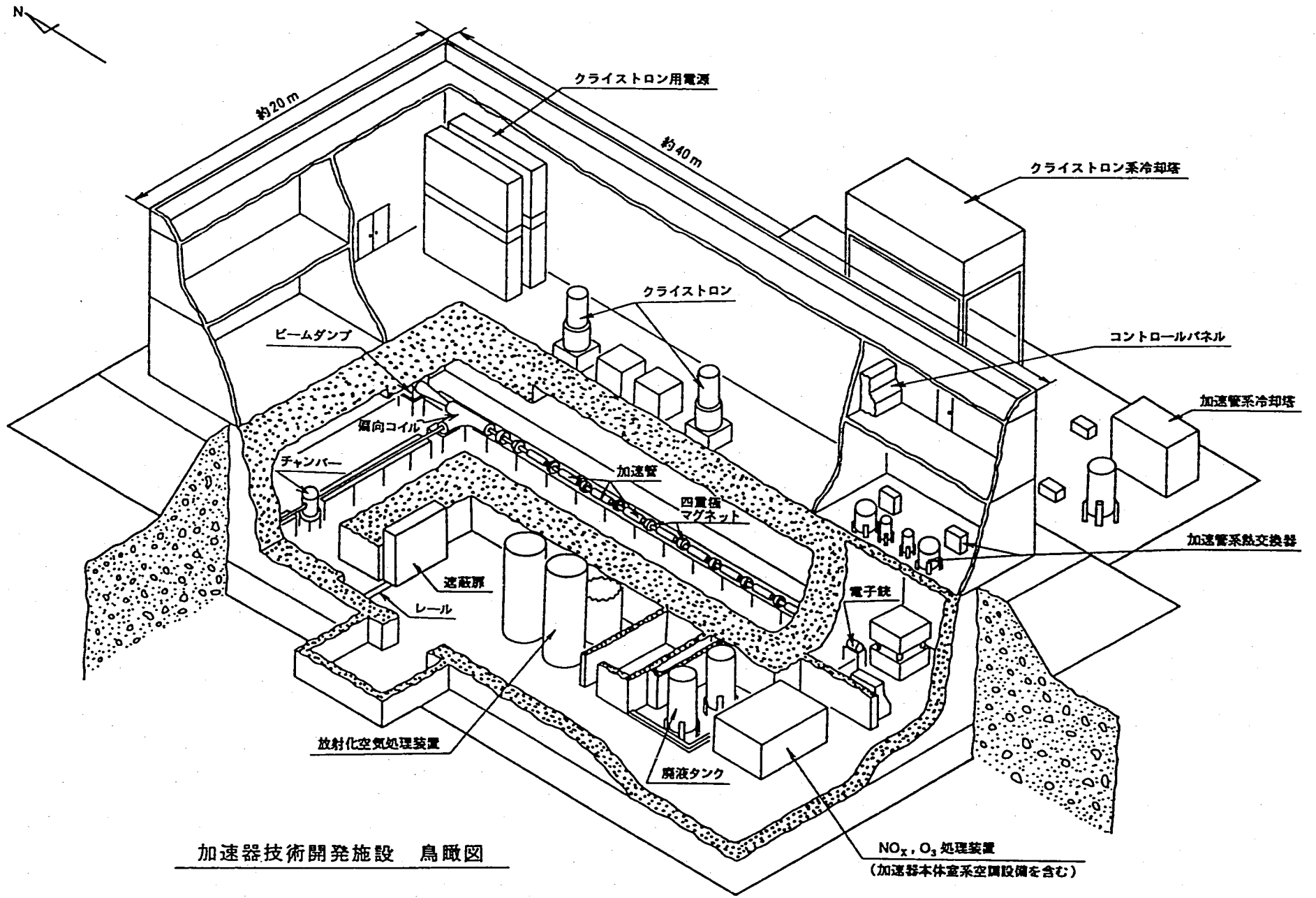
. . . dedicated to basic research in the science of elementary particle physics carried out by scientists from all over the world . . .



Operated by Stanford University for the United States Department of Energy, the Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) is devoted to experimental and theoretical research in elementary particle physics and to the development of new techniques in high-energy accelerators and elementary particle detectors. SLAC is located on 426 acres of Stanford University property west of the main campus at the base of the foothills of the San Francisco peninsula. The major experimental facility of the Center is a two-mile long linear electron accelerator.



代表的電子加速器



加速器技術開発施設 鳥瞰図

NO_x、O₂ 処理装置
(加速器本体室系空調設備を含む)

Developement of High Intensity CW LINAC

Major R&D Items

High Power Radio Frequency System

- **Klystron**

Accelerating System for High Current

- **Beam Dynamics**
- **Cooling and Thermal Stress
Analysis**

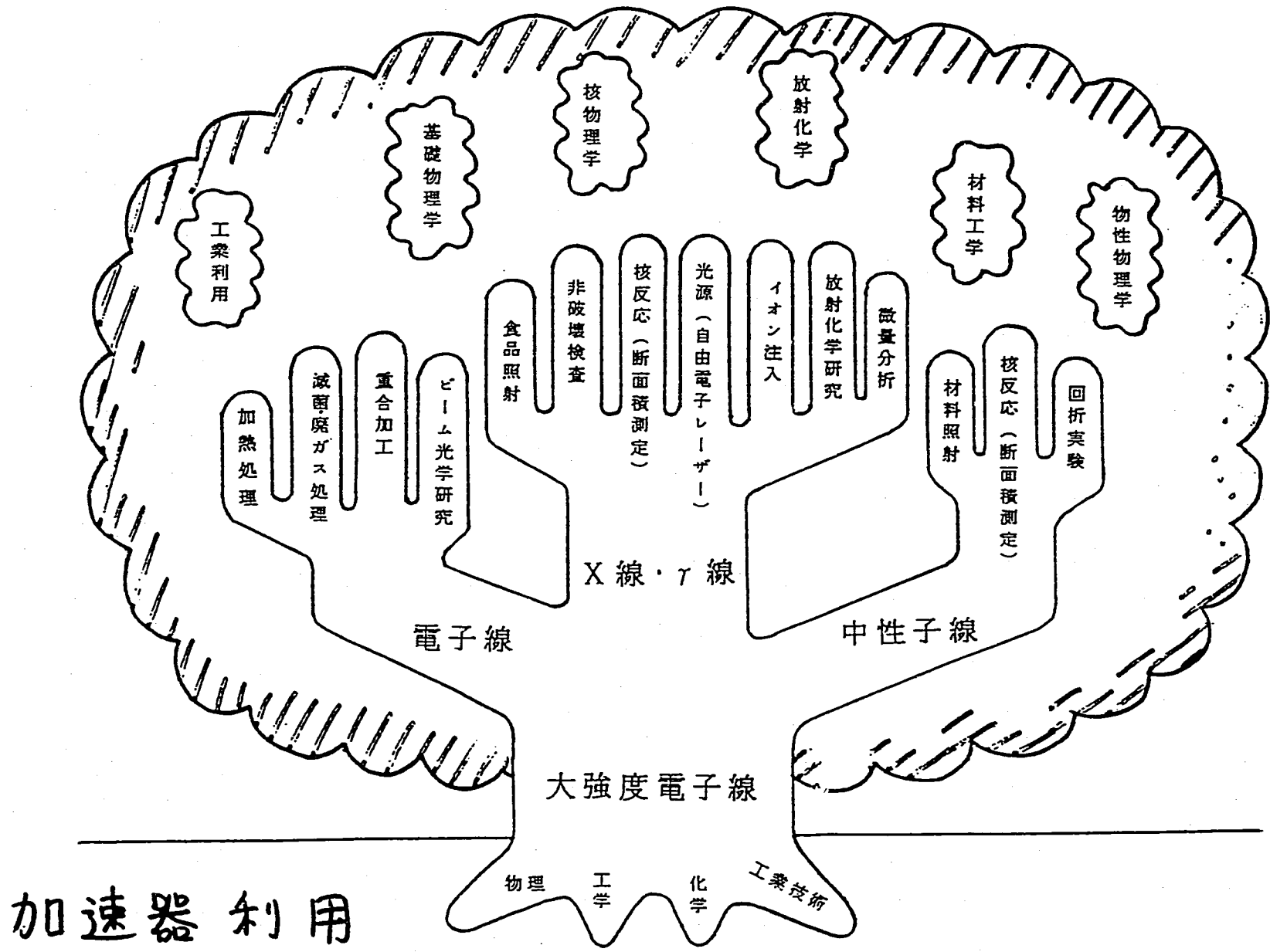
Test Linear Accelerator for R&D

10 MeV - 100mA, Duty 20 %(CW)

ETNC-EMP-013

Electron Accelerator

- **High Intensity Acceleration**
Beam Break Up
- **Energy saving**
- **Stuty for further Facility**



PNC加速器からの放射線

1. 放射線源としての加速器

○ 制動X線 (前方に強い指向性)

(Swansonの式) $D(90^\circ \text{ at } 1m) \approx 10^2 [(Gy/h) / kW] = 2 \times 10^4 (Gy/h)$

$$D(0^\circ \text{ at } 1m) \approx 20 E^2 [(Gy/h) / kW] = 4 \times 10^5 (Gy/h)$$

(医療用加速器からの外挿) $D(\text{at } 1m) \approx 1.2 \times 10^5 (Gy/h)$

○ 中性子 (等方的)

— 直接放出過程

$$E_n = E_x - E_{bin}$$

— 蒸発スペクトル (1 MeV付近にピーク)

$$\frac{dN}{dE_n} = \frac{E_n}{T^2} \exp(-E_n/T)$$

中性子線量率：ターゲットにより異なる。

～数100 Gy/h (at 1 m)

電子加速器から出る放射線

W.P. Swanson: Radiological Safety Aspects
of the Operation of Electron Linear Accelerators
(IAEA Tech. Rep. Series No. 188) より

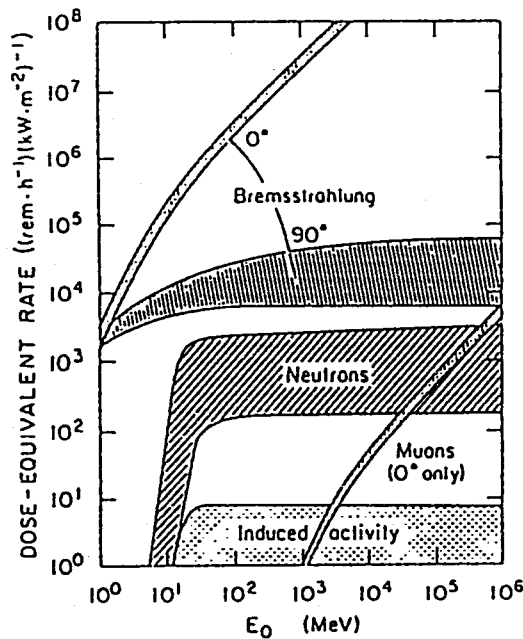


FIG. 8. Dose-equivalent rates per unit primary beam power, produced by various types of 'secondary' radiations from an electron target, as a function of primary beam energy, if no shielding were present (qualitative). The width of the bands suggests the degree of variation found, depending on such factors as target material and thickness.

大電流加速器(200kW)からの制動放射線
線量率(ターゲットから1m位置)

D(90°方向) $\approx 2 \times 10^4$ Gy/h
D(0°方向) $\approx 4 \times 10^5$ Gy/h

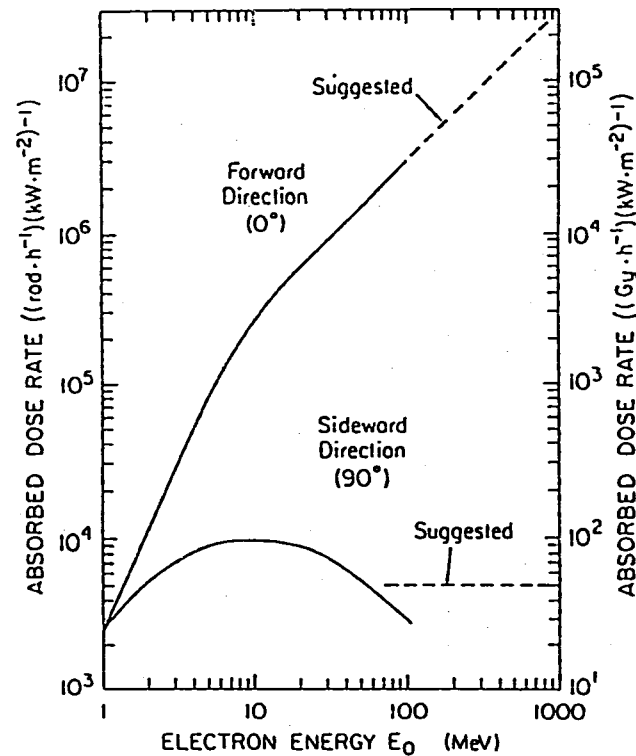
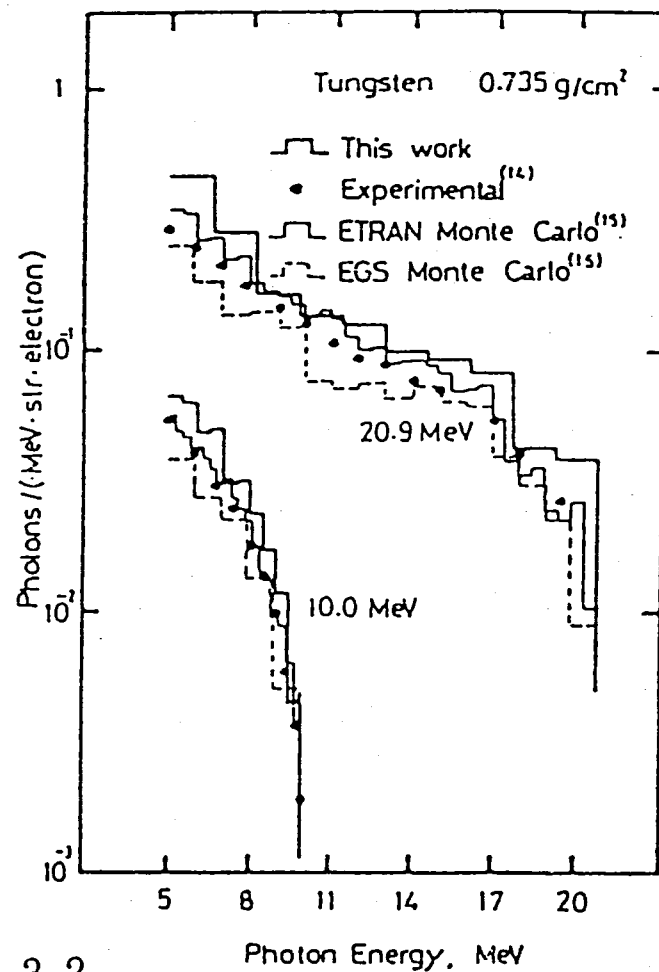
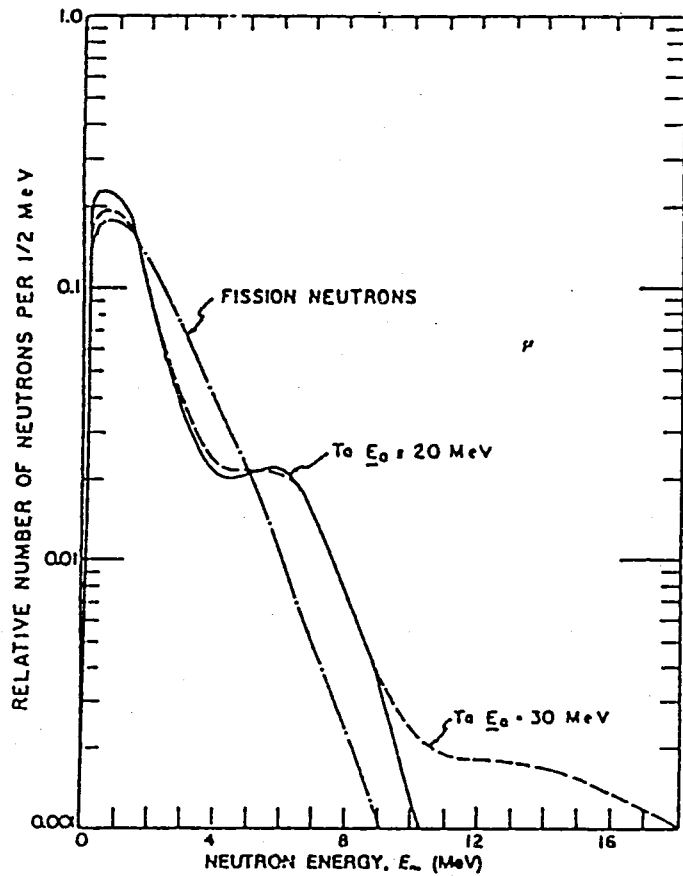


FIG. 9. Thick-target bremsstrahlung from a high-Z target. Absorbed dose rate at 1 metre per unit incident electron beam power (kW) as a function of incident electron energy E_0 . The dashed line at 0° represents a reasonable extrapolation of the measured values. The dose rates measured in the sideward direction (smoothed for this figure) depend strongly on target and detector geometry and vary by more than a factor of two. The dashed line at 90° represents the more penetrating radiation component to be considered in room shielding. (See Footnote 9 for references to original sources.)



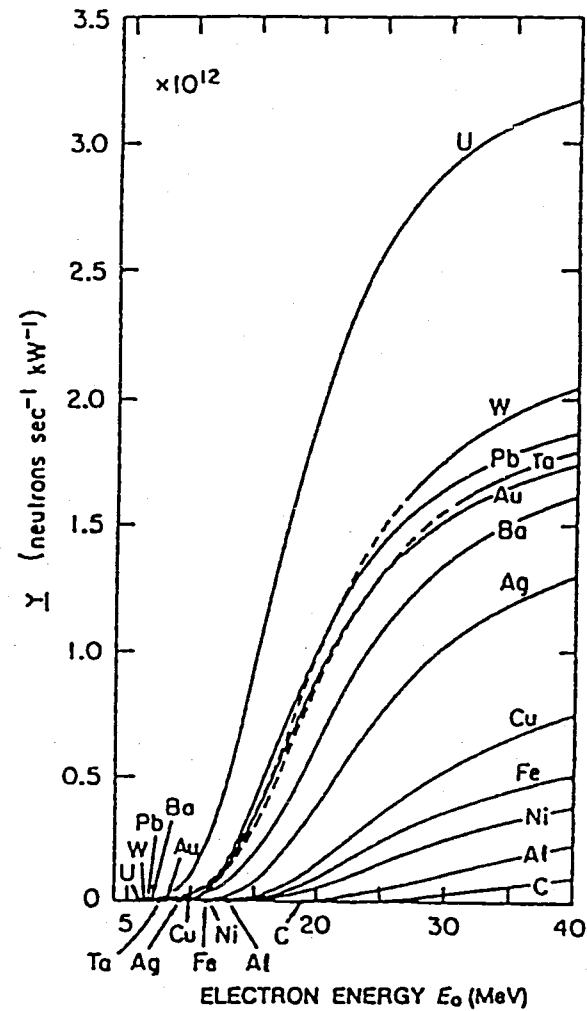
3.3.2

Comparison of calculated forward bremsstrahlung spectra from 0.735 g/cm² tungsten target exposed to 10 and 20.9 MeV electrons. Monte Carlo results: Shin et al. (Solid curve), Berger-Seltzer (ETRAN), and Ford et al. (EGS). Experimental points O'Dell Jr et al. (from Shin et al.¹⁴).



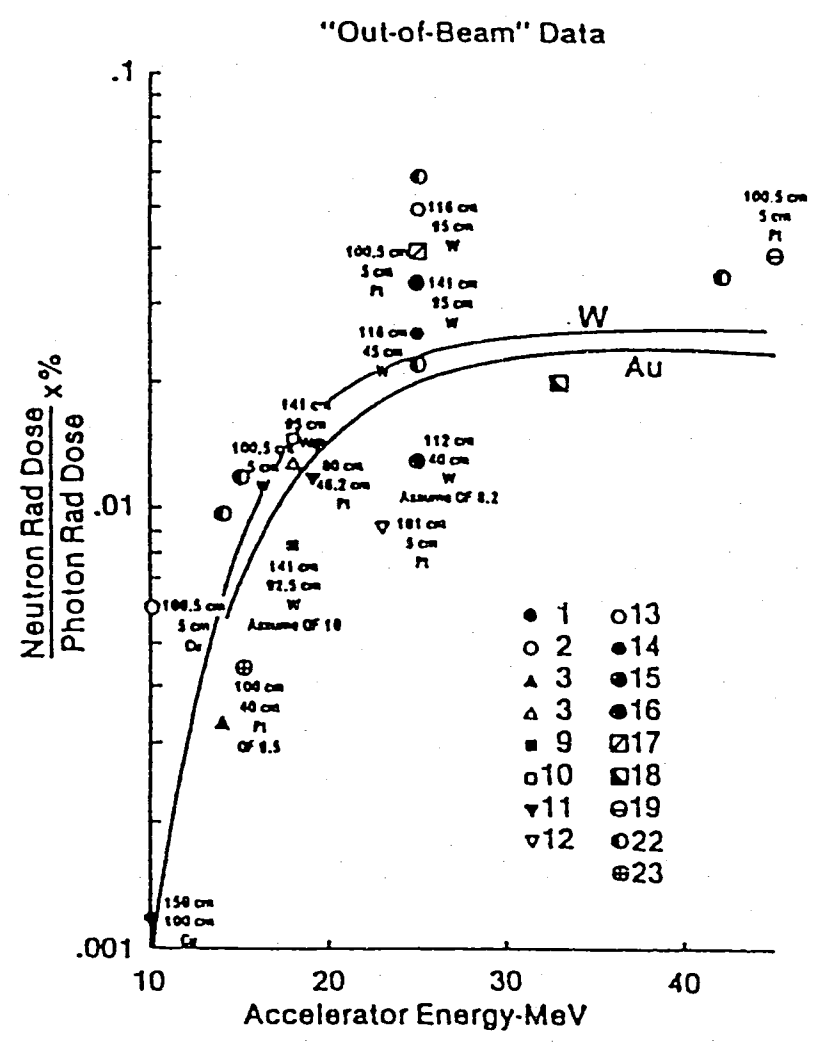
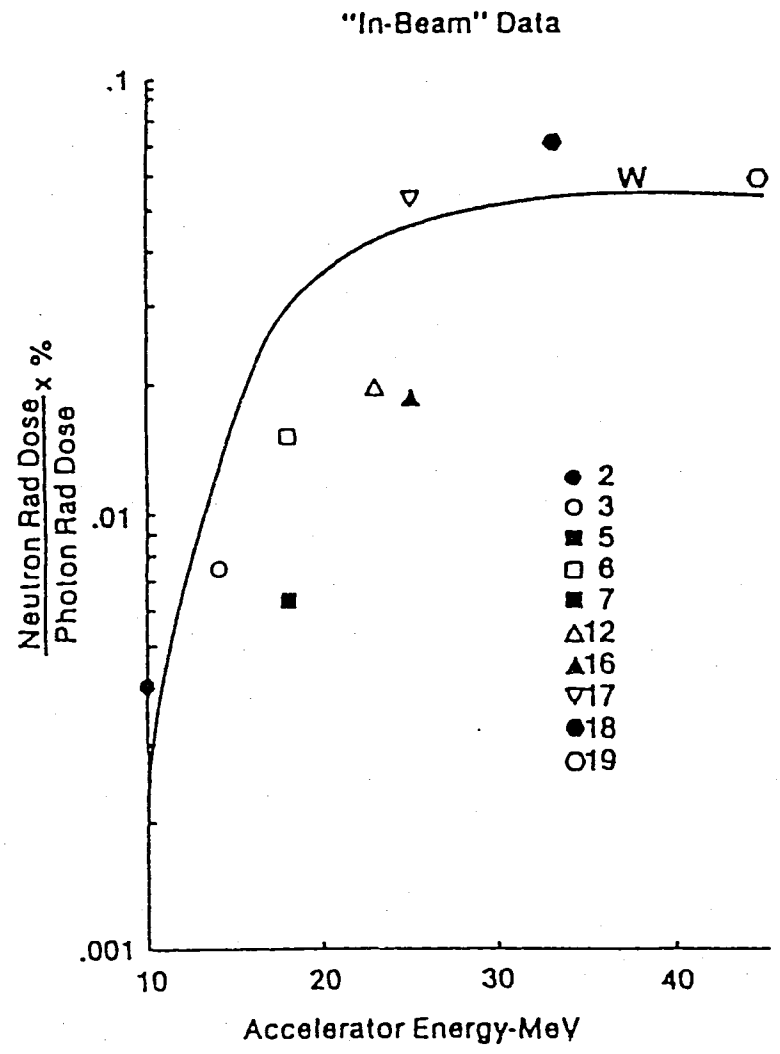
Photoneutron spectra for tantalum with peak bremsstrahlung energies of 20 and 30 MeV. A fission neutron spectrum is shown for comparison (NCRP, 1964).

☒ - 5



☒ - 6

Neutron yields from semi-infinite targets of various materials per unit incident electron-beam power as a function of incident electron energy E_0 . (Swanson, 1979).



3.3.7

2. 放射線利用

	物理	化学	生物	工学	宇宙開発
○ X・ γ 線利用					
○ 中性子利用	冷中性子利用				
○ 電子（陽電子）利用	物性状態分析			物性状態分析	
○ 自由電子レーザー	同位体分離				

	計測利用	照射利用
○ X・ γ 線利用	大強度放射線計測技術開発	耐放射線材料開発
○ 中性子利用	大強度放射線計測技術開発	耐放射線材料開発
○ 電子（陽電子）利用		
○ 自由電子レーザー		リソグラフィ

表 1.2.1 アイソトープおよび放射線の応用の分類

現象・作用分類	手段・方法	利用技術・利用例		
計測応用 (情報検出)	放射性壊変	核種分析 — 年代測定 — 資源探査		
	放射線放出	放射体追跡 — 化学的トレーサー — 物理的トレーサー — オートラジオグラフィ — シンチスキャン, 放射型 CT		
	原子・分子の 励起, 電離	γ線検知	γリレー	
		蛍光体発光測定 — 気体電離測定	蛍光体分析 — 煙感知器, ガスクロマトグラフィ	
	放射線の受け る変化	透過, 散乱測定	厚さ計, 密度計, 分析計, レベル計など	
		透過像撮影	ラジオグラフィ, 透過型 CT	
		結晶回折測定	物性状態分析, 応力測定	
		γ線共鳴測定	メスバウア分光	
	2次放射線発 生	特性X線測定	蛍光X線分析, PIXE	
		陽電子消滅測定	物性状態分析	
		電子対生成測定	石炭灰分計など, 分析計	
		放射化・核種分析	放射化分析	
		即発放射線分析	中性子捕獲γ線分析など	
	照射利用 (エネルギー付与)	物理的作用	蛍光体発光	夜光時計など
			気体電離	放電管特性改善, 静電除去器
起電力発生			原子電池	
熱発生			熱源, アイソトープ発電器	
化学的作用		活性種生成	化学反応解析	
		橋かけ	耐熱性など高分子物性改善	
		崩壊	リソグラフィ	
		重合	高分子合成, キュアリング	
		グラフト重合	機能材合成	
		分解・合成	有機合成, 排煙処理	
生物学的作用		殺菌	医療用具などの滅菌, 廃水処理	
		発芽防止	食品保存	
		細胞破壊	がん治療	
		突然変異	品種改良	
		不妊化	害虫駆除	

はなくても、物質に現れる効果は表 1.2.1 に示されるように、物理的、化学的、生物学的作用と大きくわかる。このうち、物理的作用の利用については、放射性日用品と呼ばれるものを含めて3章の最後(3.4節)にまとめられている。

化学的作用は、これを取り扱う分野がとりもなおさず放射線化学であり、種々工業的に利用されているので、その基礎から応用までを4章にまとめて述べている。

生物学的作用に関しては、5章において基礎的作用と農学利用を、また、6章において臨床医学への利用を述べている。

[富永 洋]

付録 2

講演OHP集 1

自由電子レーザーと低速陽電子利用

高エネルギー物理学研究所

榎本 収志

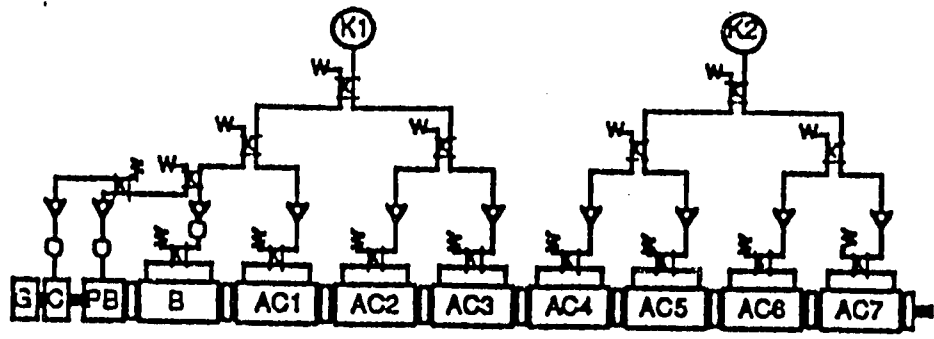


Figure 1. Block diagram of the PNC CW-Linac: G is the electron gun; C, a chopper; PB, a prebuncher; B, a buncher; AC, a regular accelerator section; K, a klystron; x, a directional coupler; w, a dummy load; o, an attenuator; and Δ, a phase-shifter.

Table 1
Parameters of the PNC CW-Linac

General		
operation mode	CW-mode	Pulse-mode
duty	100%	20%
pulse width		0.8 ms
repetition rate		250 pps
energy	10 MeV	18 MeV
current	100 mA	55 mA
Klystron (Target)		
power	1.2 MW	4 MW
beam voltage	90 kV	147 kV
beam current	25 A	56.5 A
micro-perveance	0.8	
gain	50 dB	
efficiency	65%	
length		3.4 m
Accelerator section		
type	traveling-wave	
operation frequency	1249 MHz	
wavelength	24 cm	
section length	1.2 m	
gain (max)	1.4 MV/m	2.5 MeV/m
number	7	
Resonant ring		
transmission (no load)	0.946	
transmission (load)	0.850	

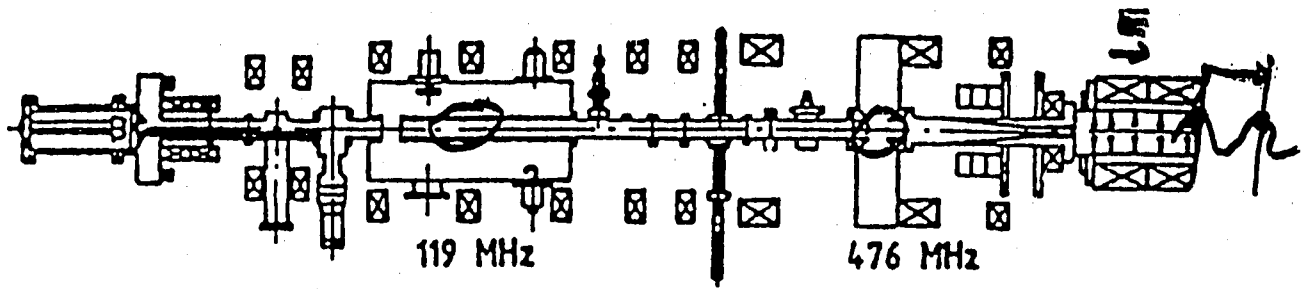


Fig. 1 - Conventional injector with velocity modulation

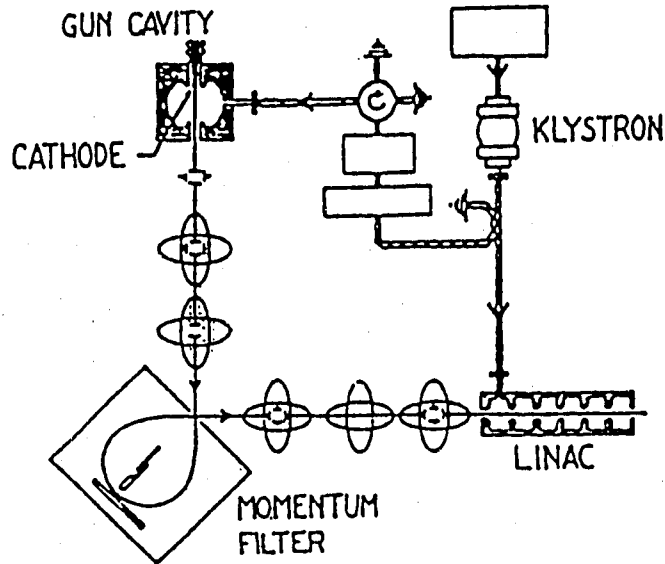


Fig. 2 - Schematic of the MARK III RF gun (Stanford)

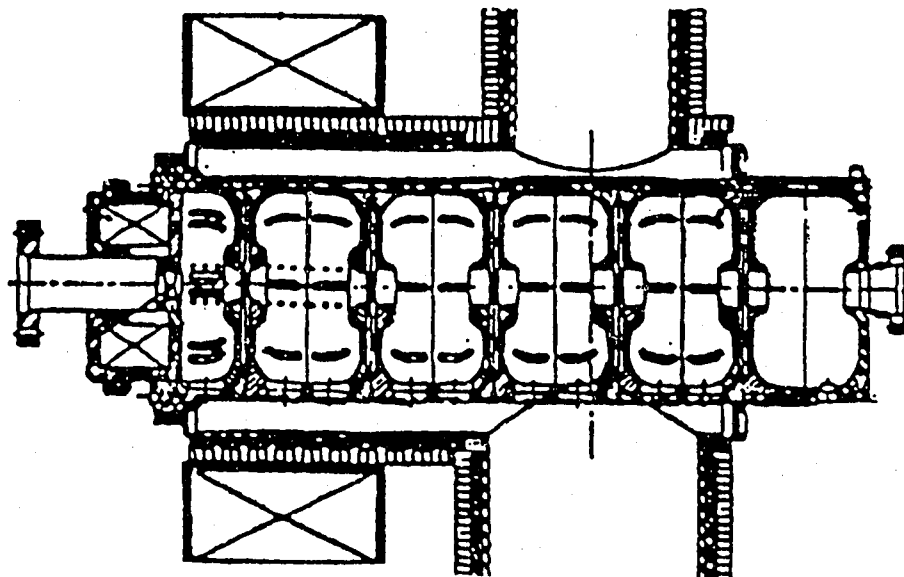


Figure 9 - Cutaway view of the LANL photoinjector.

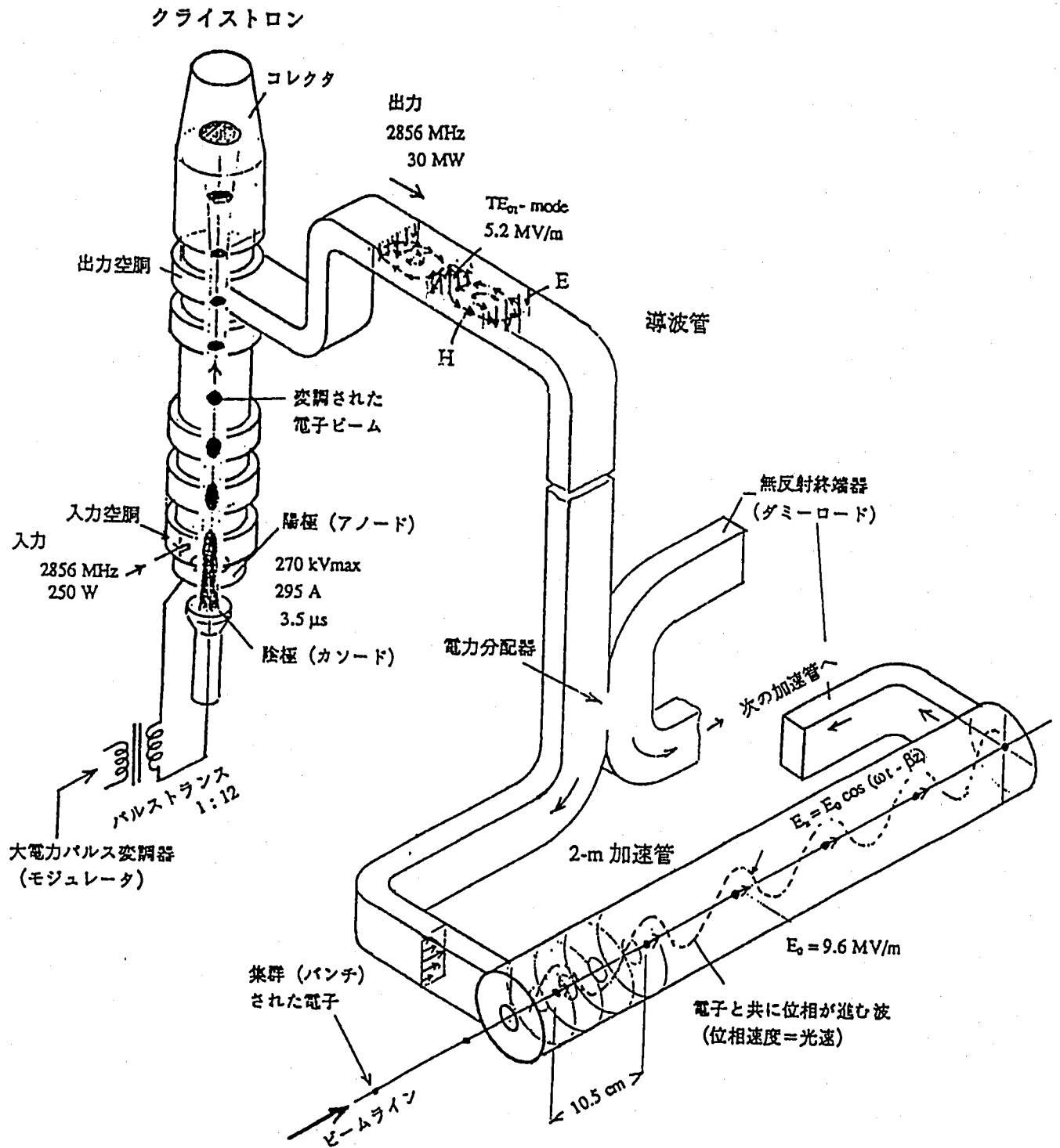


図 I-2-2 電子線形加速器の加速ユニット

Continuous Beam Electron Machines

1) Pulse Linac + Pulse Stretcher Ring

	TOHOKU	Saskatchewan	MIT	NIKHEF
E (MeV)	129.1	114-293 (50~300)	1000	910
η (%)	80	65 (100)	85	90
I_{av} (μA)	1.0	8.0 (70)	50	67
$\Delta E/E$ (%)	0.2	± 0.02 (± 0.01)	0.04	
E_x (mm-mrad)	4	1 (0.3-0.6)		
E_y (")	2	1 (0.3)		
year	1982		1993-4	1992

2) CW LINAC

	MAINZ	HEPL	S-DAUNAC	CEBAF	LISA	MAXE
E (MeV)	855	40 (70)	10, 30-50, 75	4000	25 (49)	10
η (%)	100	100	100	100		
I_{av} (μA)	40 μA (2s)		5 20	200		
$\Delta E/E$ (%)			$< \pm 0.13$	0.0025		
E_x (mm-mrad)	0.04			0.002		
E_y (")	"					
year	1990	改造中	1990.12	1994	1993	1991
備考		SHB BCS				増強中.

3) ULTRA HIGH POWER LINACS

E (MeV)	10	18
η (%)	100	20 (0.8ms x 250pps)
I_{av} (mA)	100	55
$\Delta E/E$ (%)		
E_x		
E_y		
year		

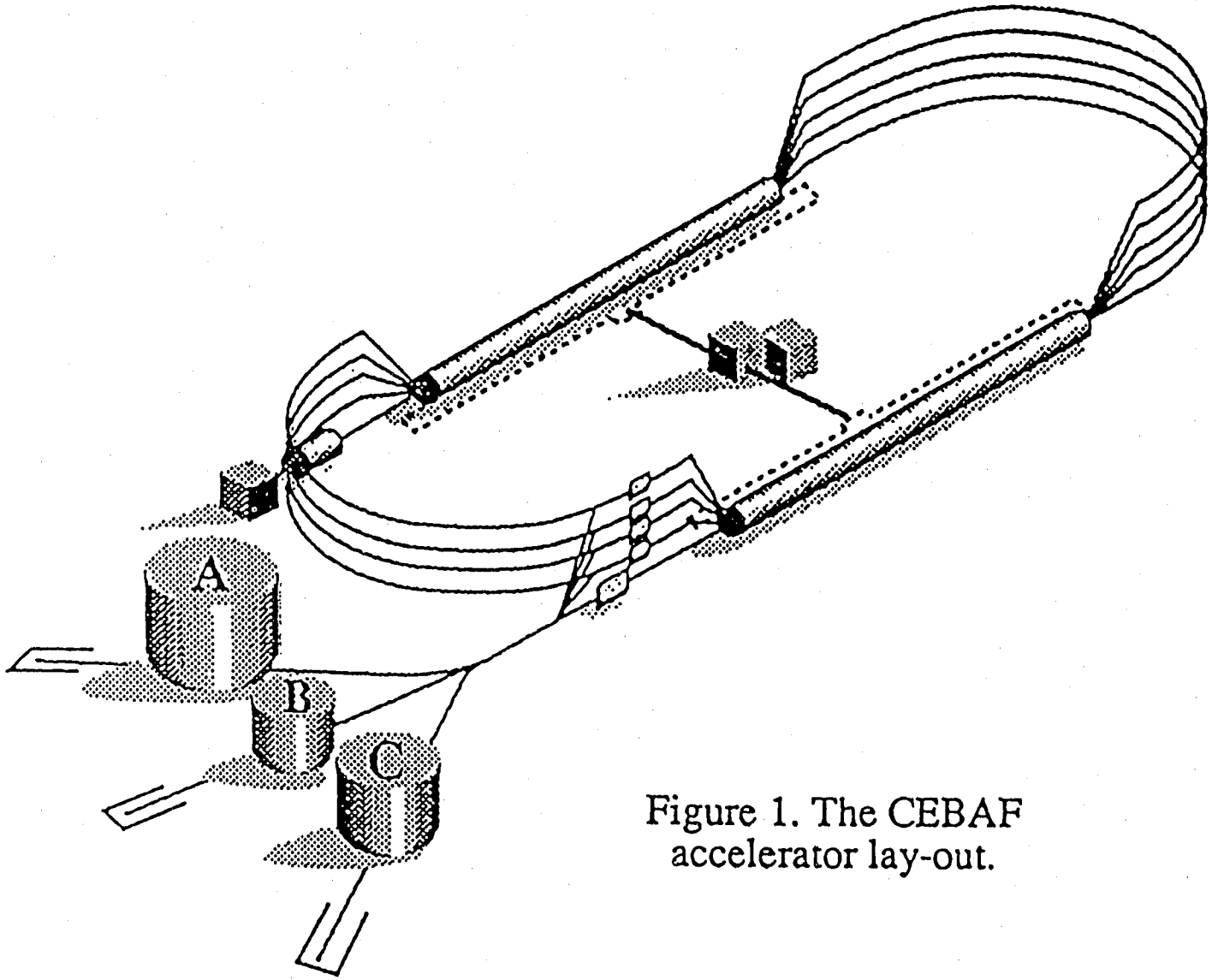


Figure 1. The CEBAF
accelerator lay-out.

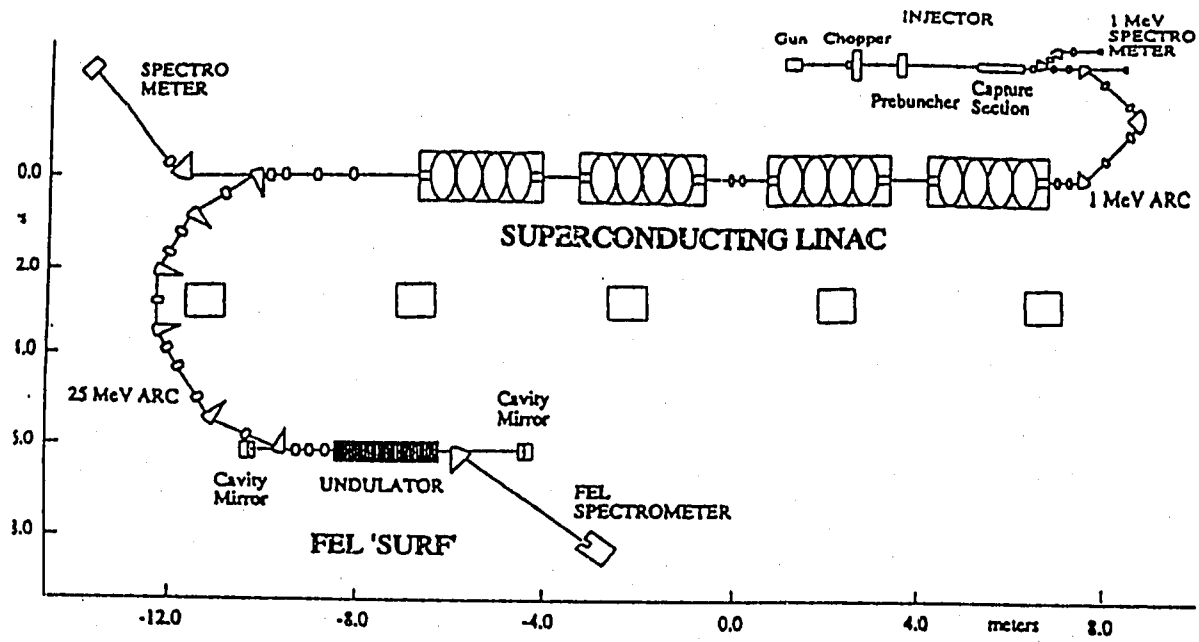


Figure 1. Layout of the complex LISA-SURF

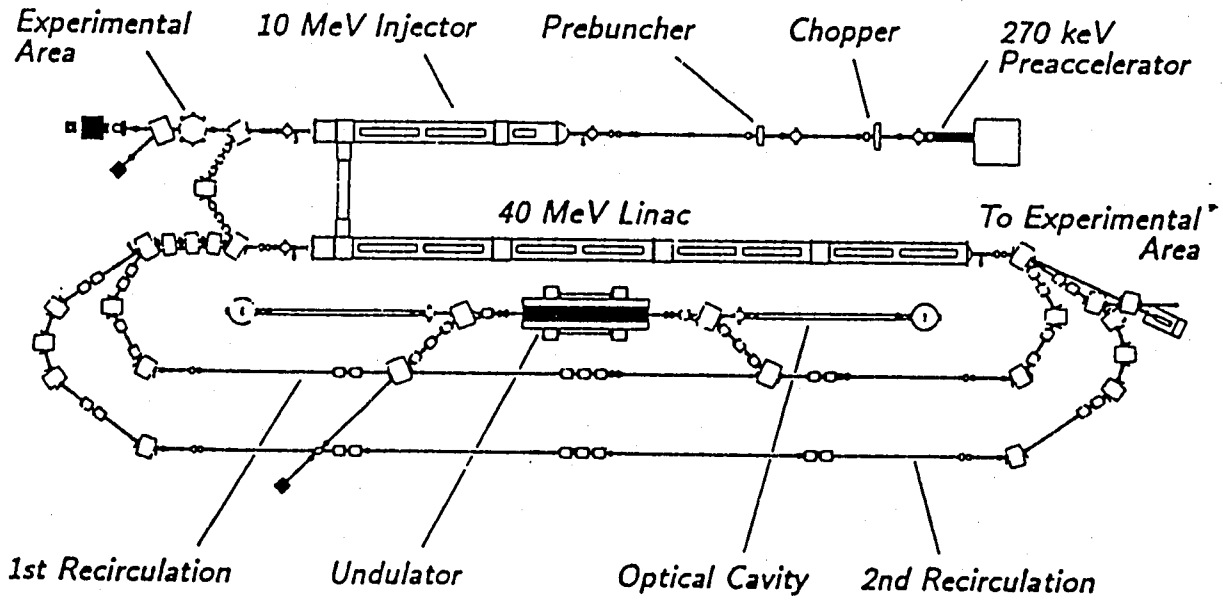


Fig. 1 S-DALINAC / FEL facility

5 m

Review of Free-Electron Lasers (Single-pass) *

Harald Genz
Institut für Kernphysik
Technische Hochschule Darmstadt
6100 Darmstadt, Germany

1 INTRODUCTION

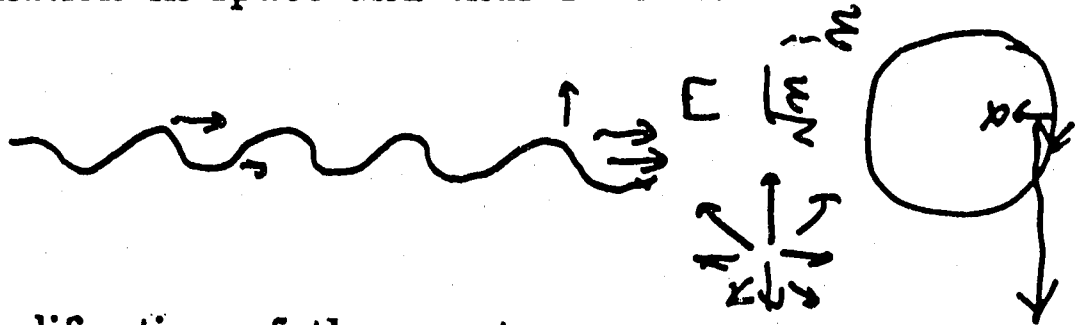
Since the first successful operation of a free-electron laser (FEL) in 1976 about fifteen facilities have managed to lase so far - six of them within the last ten months. As a matter of fact there exist currently more than 40 FEL projects worldwide and beyond that about ten more proposals are waiting for financial support. This clearly indicates the large interest in a tunable and potentially powerful source of coherent radiation over a broad range of wavelengths from the far-infrared to the far-ultraviolet regions of the spectrum.

Since it is felt that the basic physics behind the operation of an FEL is in general understood, more and more efforts are concentrating on the utilization of improved electron accelerators with respect to the beam quality, the use of high brightness injection, more compact devices and hopefully also less expensive arrangements. However, the future of the free-electron laser will depend only on its availability for applications also beyond strategic defense needs.

2 BASIC PRINCIPLES

spontaneous emission

As the electrons proceed down the undulator, they are forced by the magnetic field to perform a periodic oscillation in space and thus radiate.



amplification of the spontaneous emission

Under resonance conditions the interaction of the electrons with the combination of the electromagnetic wave and the magnetic undulator field – the so-called ponderomotive potential – causes the electrons to move from their random positions to form bunches spaced as the laser wavelength. Thus, instead of emitting their radiation at random, they radiate in phase with the laser beam.

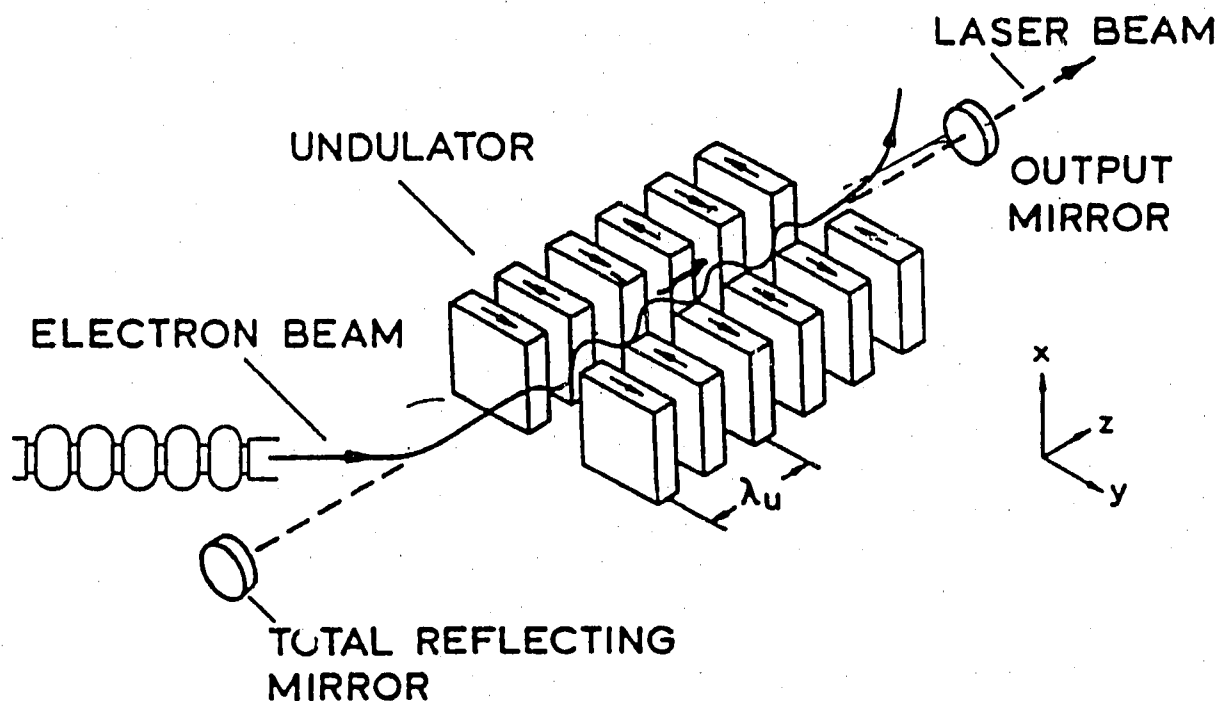


Fig. 1: Schematic diagram of a free-electron laser. A beam of relativistic electrons is directed through an alternating polarized magnetic field.

The wavelength of the emitted photons

$$\lambda_L = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left[1 + \left(\frac{eB_u \lambda_u}{2\pi m_0 c} \right)^2 + \gamma^2 \theta^2 \right], \quad (1)$$

0.08
 $\frac{20 \text{ mm}}{400} \approx 50 \mu\text{m}$

λ_u is the period of the undulator

γ is the energy of the electron in units of the rest mass 0.511006 MeV

e is the electron charge

B_u is the rms field amplitude

m_0 is the rest mass of the electron

c is the velocity of light

θ is the angle between the direction of the electron beam and the undulator axis

the small signal gain (one-dimensional theory)

$$G = 0.135 \frac{8\tilde{N}(\pi e K L)^2 \hat{I}}{4\pi\epsilon_0 \gamma^3 m_0 c^2 e c A_e} |J_0(\xi) - J_2(\xi)|^2 \times F$$

$$\times \frac{C_B}{(1 + \frac{2N\lambda_u}{3\ell_e})(1 + \mu_\epsilon^2)(1 + \mu_\Delta^2)} \quad (2)$$

N the number of undulator periods

$$K = eB_u \lambda_u / 2\pi m_0 c$$

L the total length of the undulator.

\hat{I} the peak current

J_n Bessel functions

F is the filling factor

$$F = A_e / A_0 \quad (\text{if } A_e < A_0)$$

A_e the spatial distribution of the electron beam

A_0 the size of the optical beam

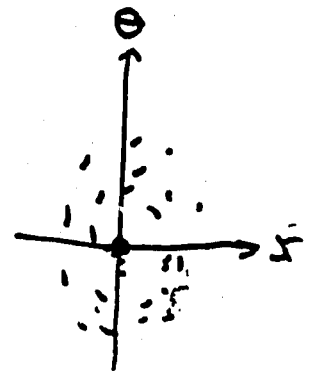
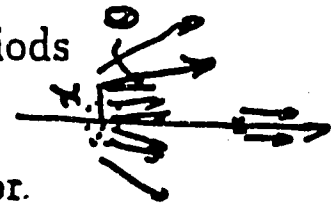
ℓ_e is the electron pulse length

$$\mu_\epsilon = 2\sqrt{2} \cdot K \epsilon_n^y L / (1 + K^2/2) \lambda_u^2$$

ϵ_n^y the normalized emittance of the electron beam (y direction)

$$\mu_\Delta = 4N \Delta E / E$$

C_B correction term for the inaccuracy of the magnetic field of the undulator



increase of power $P(M)$ after M bounces of the radiation
(for small signals)

$$\frac{P(M)}{P_0} = (1 + G_n)^M. \quad (3)$$

G_n (the average net gain per bounce of radiation in the optical resonator) - (the losses inside the cavity)

The requirements for the electron beam

$$* \text{ energy} \quad : \quad \gamma \quad > \quad 10 \quad (4)$$

$$* \text{ current} \quad : \quad \hat{I} \quad > \quad 1 \text{ A} \quad (5)$$

$$* \text{ emittance} \quad : \quad \epsilon_{\mu}^y \quad < \quad \frac{\lambda_u^2}{K} \frac{1 + \frac{K^2}{2}}{2\sqrt{2}K} \quad (6)$$

$$* \text{ energy spread} \quad : \quad \Delta E/E \quad < \quad \frac{1}{4N} \quad (7)$$

$$* \text{ pulse length} \quad : \quad \ell_c \quad > \quad N \cdot \lambda_L \quad (8)$$

e.g., $K=1$, $L=3$ m, $N=100$, $\lambda_u = 1.5$ cm and $\gamma=100$

$$\lambda_L = 1.5 \mu\text{m}$$

$$\begin{aligned} \text{at} \quad \epsilon_{\mu}^y &< 50 \text{ } \pi\text{mm mrad} \\ \Delta E/E &< 2.5 \cdot 10^{-3} \\ \ell_c &\approx 150 \text{ } \mu\text{m}. \end{aligned}$$

3 FEL FACILITIES

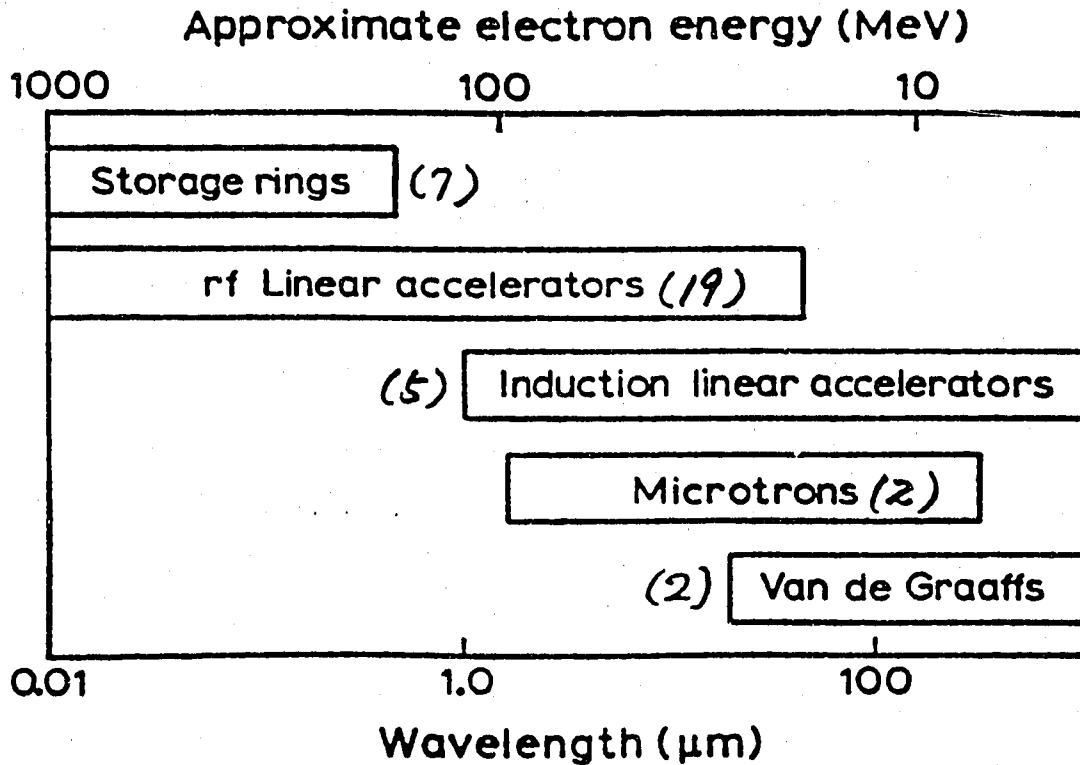


Fig. 2: Various types of accelerator technology for different electron energy ranges and accordingly different laser wavelength regions.

countries: USA (14), Japan (12), France (5), Germany (3), Netherlands (2), Italy (2), CIS (1), Israel (1) and China (1).

the first successful operation in 1976 by Madey

The shortest wavelength (240 nm)
VEPP-3 in Novosibirsk

The highest power (1 GW) (9 mm)
ETA at Livermore

Table 1: Free-electron lasers driven by linear accelerators

		Electron energy [MeV]	Frequency [MHz]	Pulse length [ps]	Repetition rate [μs]	\bar{I} [A]	\bar{I} [mA]	Wave-length [μm]	Emitted peak power [MW]	
●	Los Alamos	APEX ^a	47	1300	10-20	100	300	2.8	150	
	Boeing	APLE	36	433	70	8300	450	230	10.6	782
	Los Alamos	AFEL	40	1300	13	20	180	250	0.36;3.7	30;75
●	Vanderbilt ^a		20-45	2856	2	7	40	200	2-10	3
●	Stanford ^{a,b}		10-70	1300	3	1000-10000	6	0.2	1-25	10
●	Durham	Mark III ^a	25-45	2857	1-4	0.5-9	40	250	1.4-8.1	2
	Rockwell		83.5	2857	10-30	3.7	500	400	1.06	4000
	UCLA	KIAE	25	2856	4	4	200	5·10 ⁻⁶	5-10.6	0.001
	IAERI	SCARLET ^b	13.5	499.8	4000	1000	10	4	41.7	1
	Osaka	ISIR	38	1300	20-30	2.5	50		10-60	
	Tokyo	UT-FEL	15	2856	2	6	40	200	40-50	24
	Osaka		7	2856	2	10	100			
●	LURE	CLIO ^a	30-74	3000	10	10	100	250	2-20	10
	Bryères-le-Chatel	ELSA	20	433	30-200	200	300	200	15-25	50
●	Rijnhuizen	FELIX ^a	15-49	3000	6	20	70	200	8-80	0.1
	Twente	TEU-FEL	31	1300	20	10	100	160	10;180	15
	Rome	LISA ^b	25	500	8	1000	5	2	16	1
	Beijing		30	2856	4	5	20	220	7-25	
	Darmstadt	S-DALINAC ^b	35-50	2997	1.9	cw	2.7	0.05	2.5-6	0.1

^a: systems have lased^b: superconducting accelerator

Table 2: FEL facilities using induction and electrostatic accelerators, microtrons and Marx generators

	Electron energy	Pulse duration	Peak current	Laser wavelength	Peak Power
A. Induction accelerator					
● Livermore (ETA II) ^a	7 MeV	50 ns	3 kA	2 mm	3 GW
● Osaka (SHVS) ^a	6 MeV	100 ns	5 kA		0.1 GW
● Tsukuba ^a	0.8 MeV	80 ns	2.7 kA		10 MW
JAERI (LAX-1)	1 MeV	150 ns	3 kA		
Le Barp (LELIA)	4.5 MeV	60 ns	1.5 kA		
B. Electrostatic accelerator					
● Santa Barbara ^a	6 MeV	1-20 μs	2 A	30 μm-1.7 mm	5 kW
Tel Aviv	5 MeV	65 μs	2 A	300-3000 μm	
C. Microtron					
● Muray Hill ^a	19 MeV		2 A	160-250 μm	100 W
Frascati (ENEA)	6 MeV		5 A	500 μm	1 MW
D. Marx generator					
● New York (Columbia Univ.) ^a	1 MeV	150 ns	200 A	1-2 mm	5 MW
College Park (Univ. o. Maryland)	0.44 MeV	80 ns	10 A	3 mm	140 W
Le Barp (ONDINE)	2.5 MeV	50 ns	1000 A		
● Osaka (ELSA) ^a	0.6 MeV	8 μs	200 A		20 kW
● Osaka ^a	0.6 MeV	1 μs	20 A		100 kW
Stuttgart (DLR)	1 MeV	100 ns	25 kA	1-3 mm	10 MW

^a:systems have lased

4 APPLICATIONS

It took more than ten years until the first publication using an FEL has come out. Until now about 25 scientific papers were published [14] which is still a very small ...

Mark III - FEL (now at Duke University)

SCA-FEL at Stanford

University of California in Santa Barbara

semiconductors

photoconductivity, photodetectors, impurity hopping

photo-Hall-effect

magnetic excitations

frequency shifts in magnetic fields

transport behaviour

molecular and biology

the change in the behaviour of biological samples

under *high power FIR excitation*

6 REFERENCES

- [1] T.C. Marshall, Free-Electron Lasers, New York: Macmillan Publishing Company, 1985, p.23.
- [2] C.A. Brau, Free-Electron Lasers, Boston: Academic Press Inc., 1990.
- [3] G. Dattoli and A. Torre, CERN-Lecture, CERN 89-03 (1989).
- [4] G. Dattoli and A. Renieri, Experimental and Theoretical Aspects of the Free-Electron Laser, Laser Handbook, Vol. 3 edited by M.L. Stitch, North Holland, Amsterdam, p. 22 (1985).
- [5] D.A.G. Deacon, I.R. Elias, J.-M.J. Madey, G.J. Ramian, H.A. Schwettman and T.J. Smith, Phys. Rev. Lett. **38**, (1977) 892.
- [6] See e.g. Contributions to the annual Free-Electron Laser Conference published in Nucl. Instr. and Methods **A304** Nos.1-3 (1990) **A296** Nos.1-3 (1990) and **A285** Nos.1,2 (1989).
- [7] G.N. Kulipanov, Nucl. Instr. Meth. **A296** (1990) 1.
- [8] T.J. Orzechowski, Phys. Rev. Lett. **54** (1985) 889.
- [9] R. Dei-Cas, Service de Physique et Techniques Nucleaires, B. P. N° 12-91680 Bryeres-le Chatel, France, 1991.
- [10] P.W. van Amersfoort et al., Nucl. Instr. and Methods, **A304**, (1991) 163.
- [11] J.C. Bourdon et al., Nucl. Instr. and Methods, **A304**, (1991) 322.
- [12] K. Alrutz-Ziemssen et al., Nucl. Instr. and Methods, **A304**, (1991) 159 ;H. Genz et al., this conference.
- [13] N.A. Vinokurov, Invited talk, this conference.
- [14] W. Grill, Energy Conference on Accelerators in Applied Physics and Technology (ECAART), September 3.-7., 1991, Frankfurt, Germany, to be published in Nuclear Instruments and Methods.
- [15] P.W. van Amersfoort et al., contributed paper, this conference.

LASING WITH FELIX

FOM-Instituut voor Plasmafysica 'Rijnhuizen',
Nieuwegein, Nederland

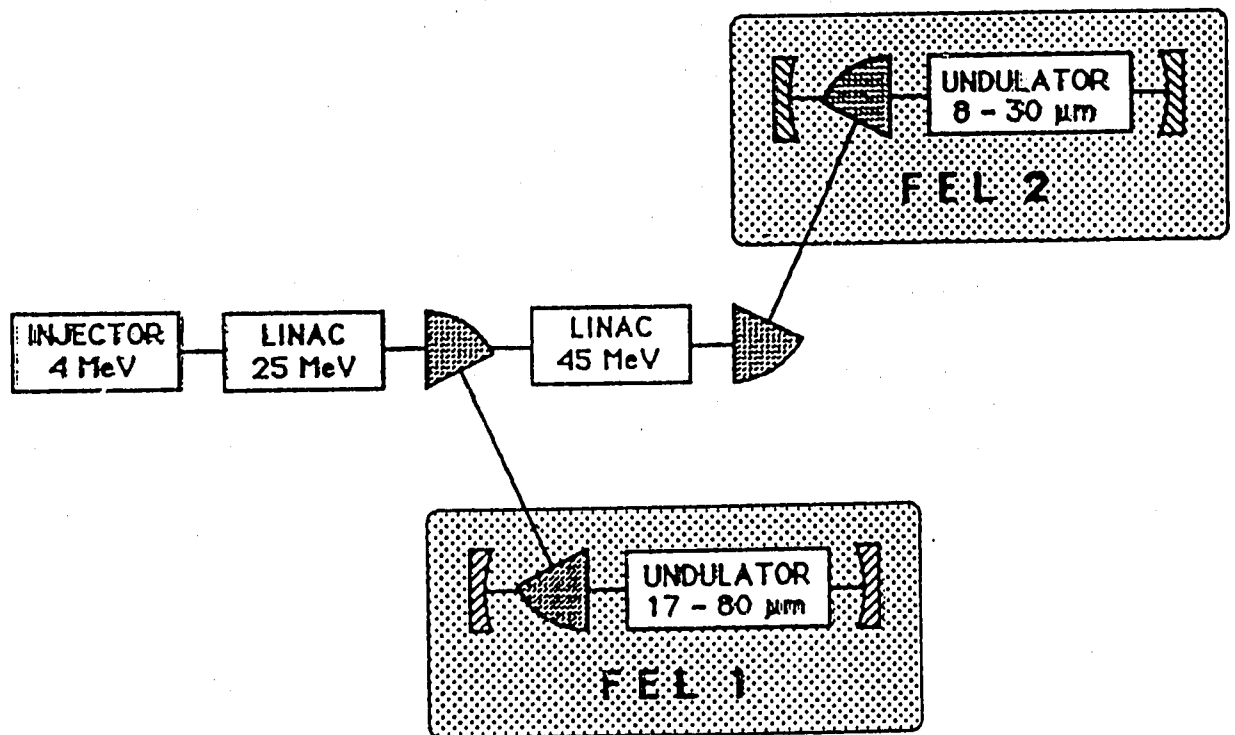
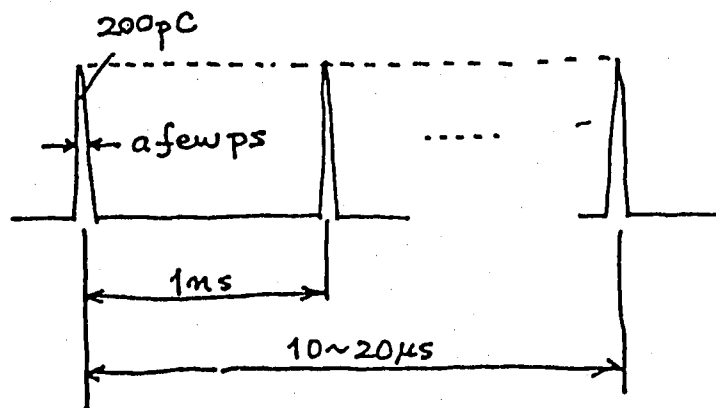


FIGURE 1. Schematic layout of FELIX, Stage I.



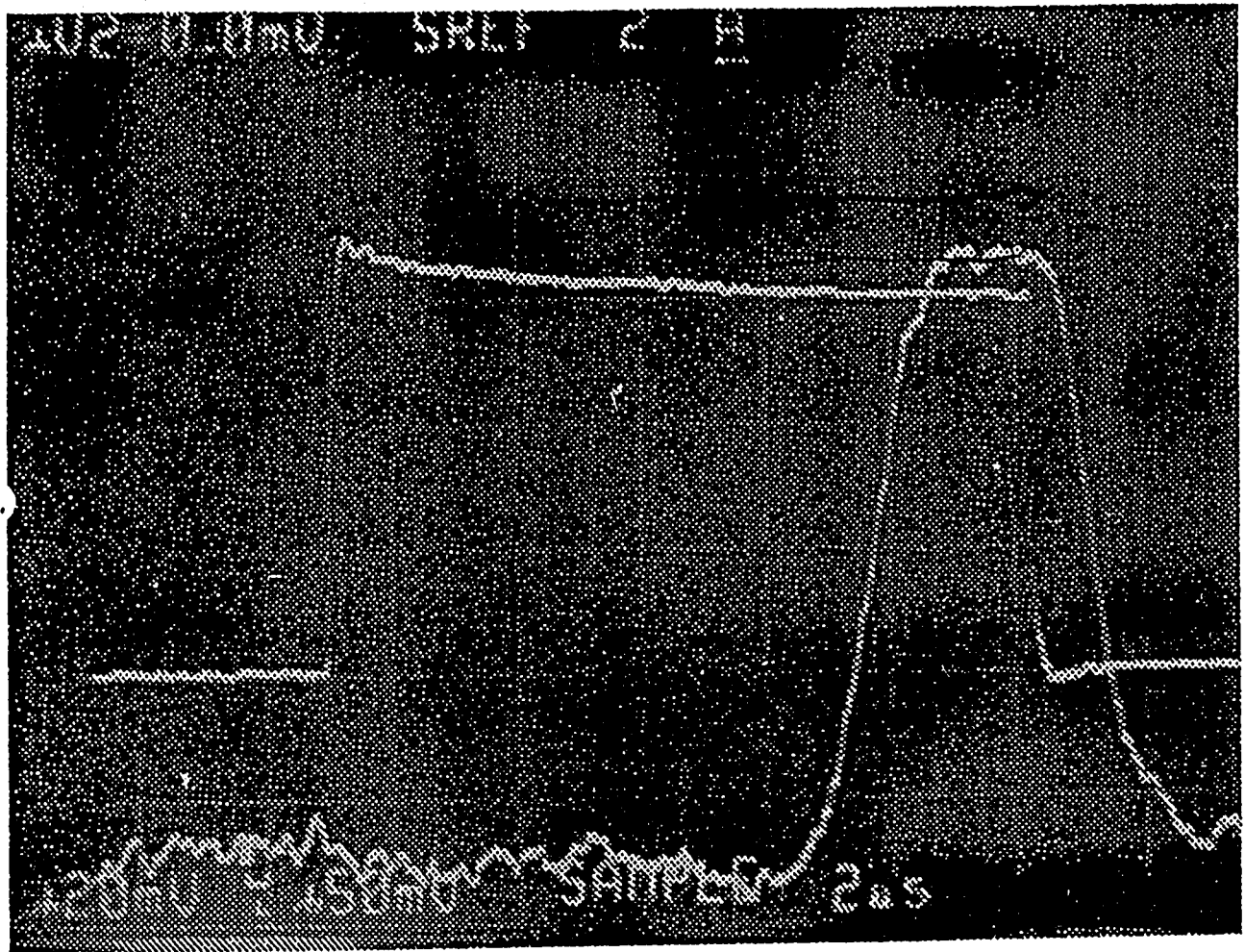


FIGURE 2. Saturated laser pulse (lower trace) and the current pulse (upper trace). A division along the horizontal axis corresponds to a period of $2 \mu\text{s}$.

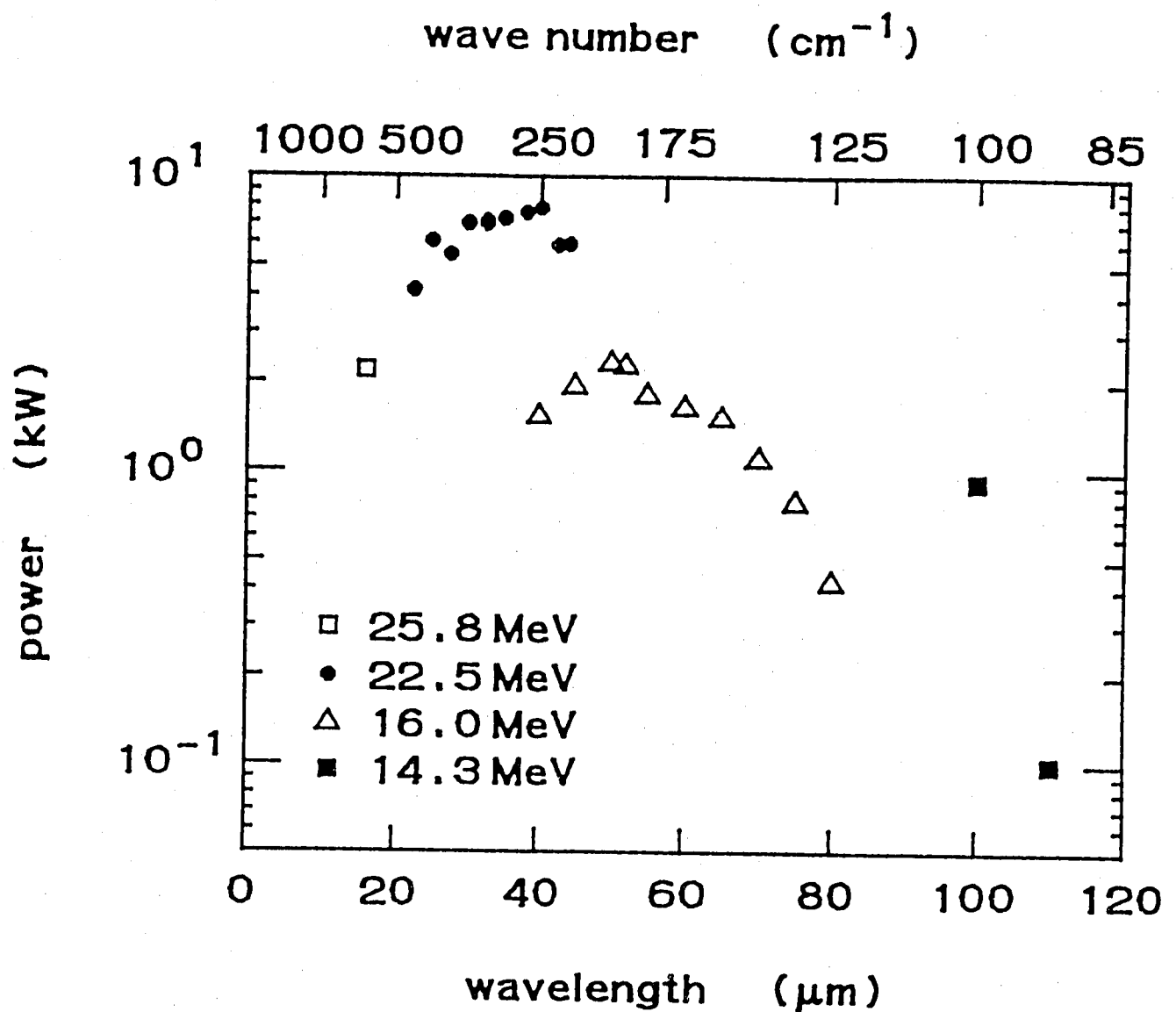


FIGURE 3. The average output power during the saturated part of the macropulse as a function of the radiation wavelength, for different electron energies. At a given energy, the wavelength is varied by variation of the undulator strength.

First lasing of the CLIO FEL

Table 2

Main accelerator features

Type	3 GHz rf linac
Energy range	50 ± 20 MeV
Electron gun	gridded thermionic dispenser cathode
Subharmonic buncher freq.	500 MHz
Fundamental buncher type	standing wave
Accelerating section type	travelling wave (4.5 m)
Klystron	TH 2130 V
Micropulse length (FWHM)	10-15 ps
Macropulse length (flat-top)	11 μ s
Micropulse peak current (estimated)	50 A
Micropulse charge	
at gun exit	1 nC
at undulator entrance	0.5 nC
Micropulse interval	4, 8, 16, 32 ns
Macropulse repetition rate	6.25, 12.5, 25, 50 Hz
Average beam power	up to 7.5 kW
Emittance: $4\pi\beta\gamma\sigma\sigma'$	
required	$< 150\pi$ mm mrad
calculated	40π mm mrad
measured	80π mm mrad
Measured energy spread (FWHM)	0.7 %

Table 3

Main features of the undulator

Length	0.96 m + 0.96 m (tapered)
Period	4 cm
Number of periods	2 x 24
Gap	adjustable > 11.7 mm
K	0 - 2

Table 1.

Main FEL features

Spectral range	2-20 μm
Max. average power	20 W
Peak power (macropulse)	6 - 50 kW (8 μs)
Peak power (micropulse)	15 MW (10 ps)
Energy / macropulse	40 - 300 mJ
Repetition rate:	
macropulse	1 - 50 Hz
micropulse	every 4 - 32 ns

Table 4

Measured laser characteristics.

Spectral range (1 st harmonic)	5 - 10 μm
Gain at 5 μm	
measured	25 %
theory for I=50 A	40 %
Gain at 8 μm	
measured	70 %
theory for I=50 A	75 %
Extracted power:	
peak (micropulse)	6 MW
average (macropulse)	2 kW
time average	100 mW
Efficiency	
measured	0.3 - 0.4 %
theoretical	0.5 %

Reported gain values are net. They are estimated from the laser risetime at the very beginning of the laser growth to which the losses, estimated from the decay time, are added.

The following figure shows an example of observed saturation.

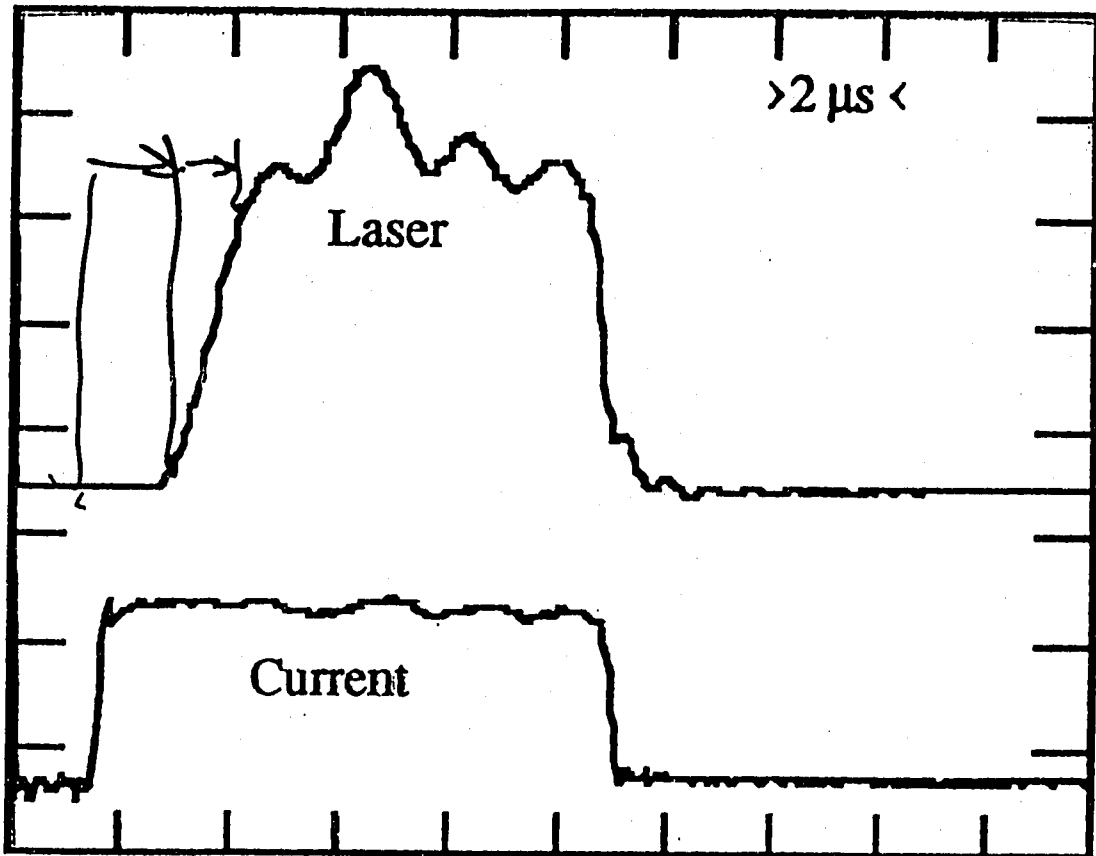
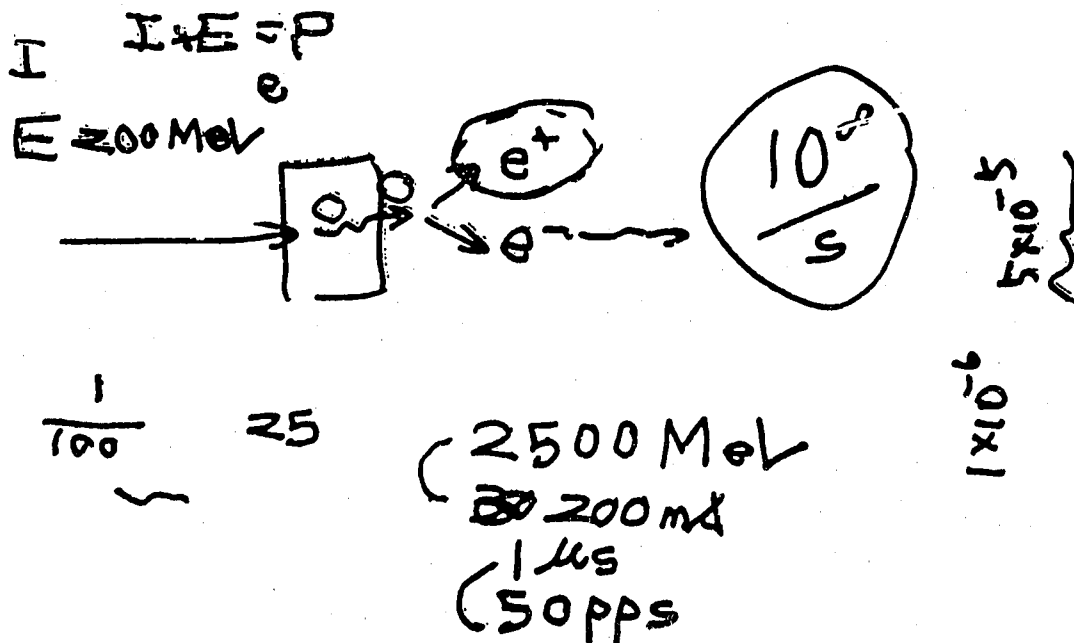


Fig. 2. Laser saturation at 8 μm; ZnSe plate.



付録 2

講演OHP集 2
大電子ビームの放射線利用

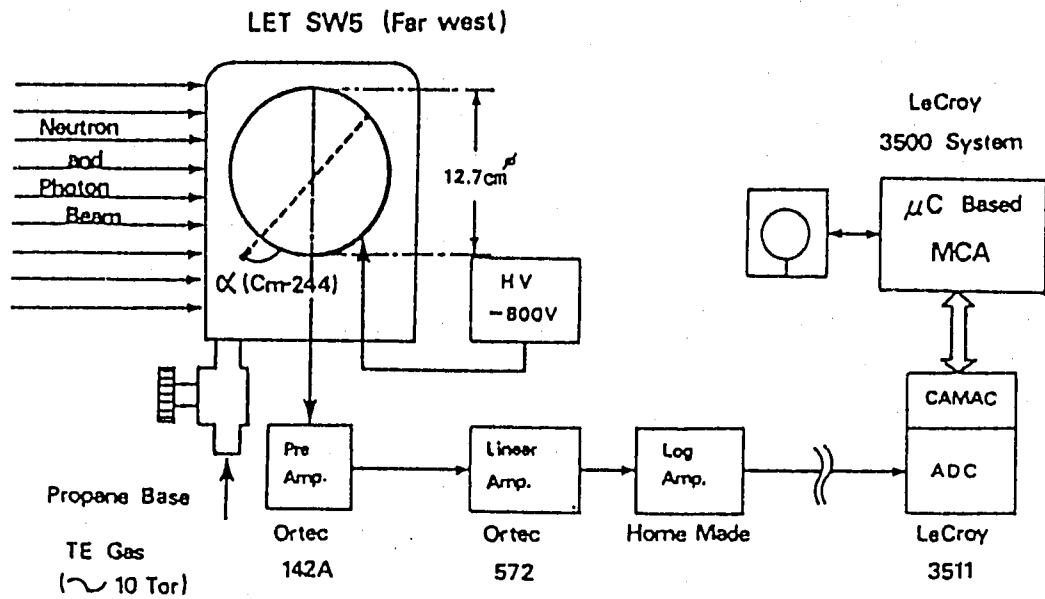
東北大学 CYRIC
中村 尚司

大電流電子ビームの放射線利用

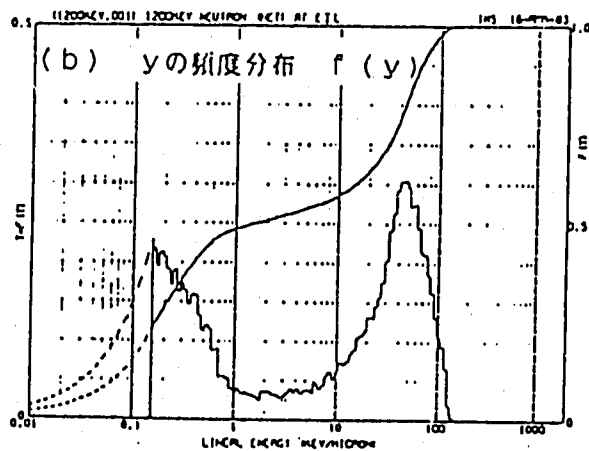
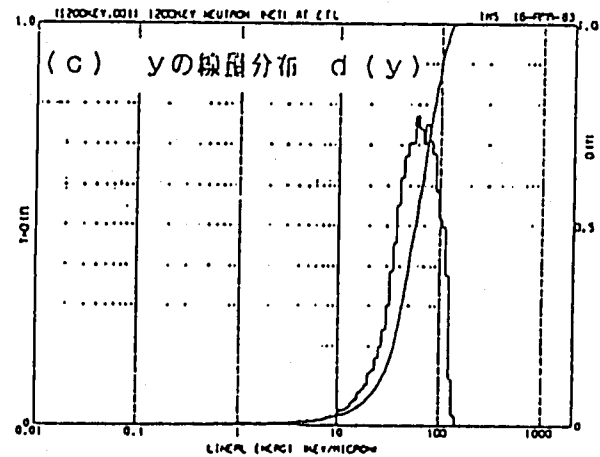
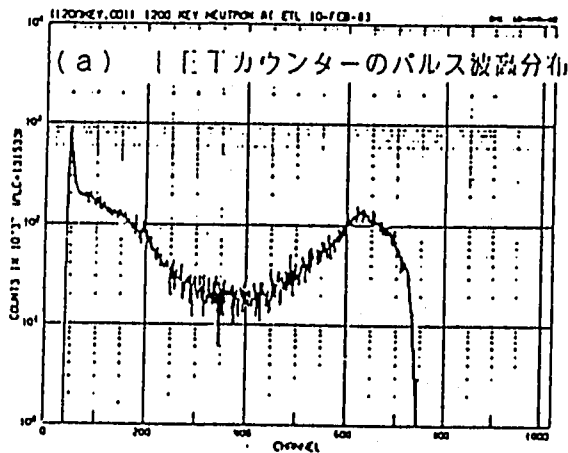
研究テーマの例

- (1) 物質中での電子のエネルギー吸収
 - ・ ファントム中でのエネルギースポットと深部線量分布
 - ・ 診断放射線のエネルギースポットと深部線量分布
- (2) ハールスドシメトリ, 混合場ドシメトリ
- (3) NO_x の生成機構
- (4) 単色大強度 γ 線の発生
positron annihilation in flight
- (5) 核融合炉における迷走電子による材料損傷
のシミュレーション
- (6) 超ウラン元素の (γ, f) 反応断面積の測定
- (7) 反跳法を用いた radioactive target
(^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{129}I , ^{99}Tc 等) の (γ, X) 反応
断面積の測定
- (8) 体系内における γ , n の生成, 発熱分布
放射化量の評価

LETスペクトロメータ



LETスペクトロメータシステムのブロック図

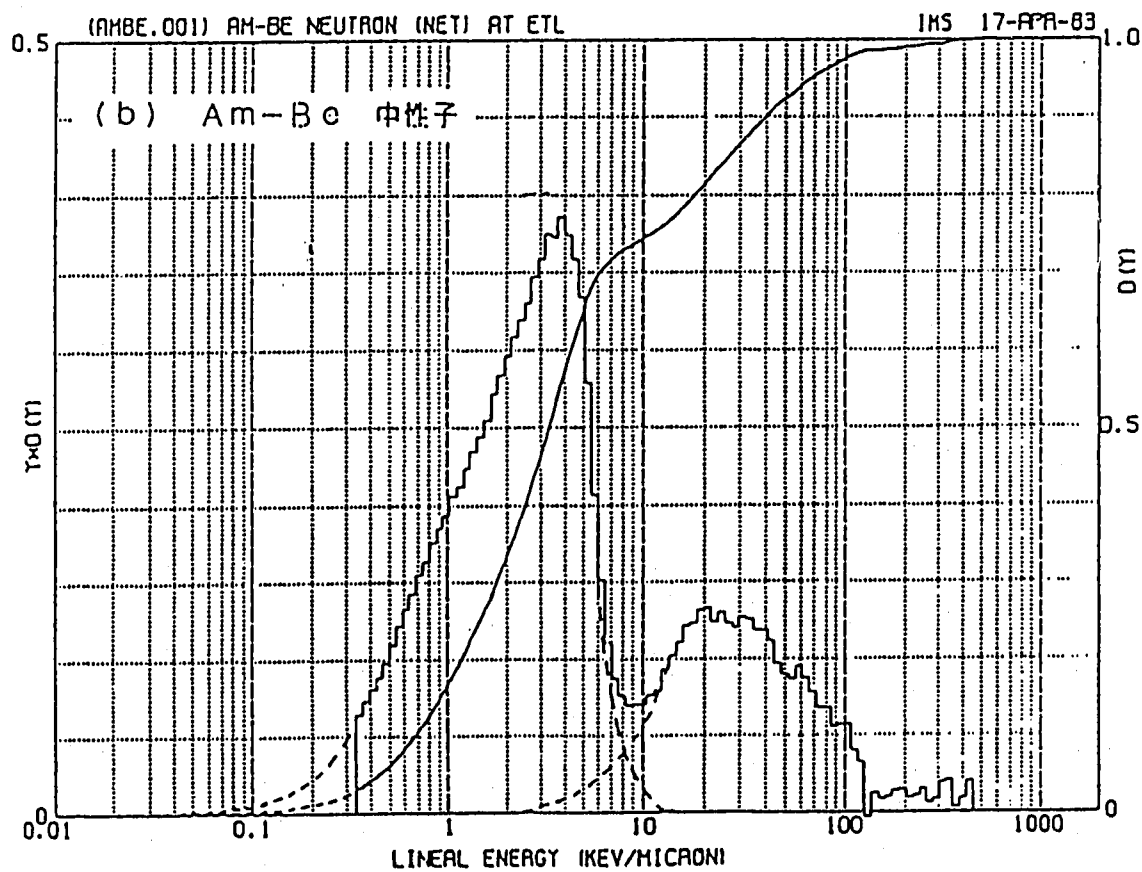
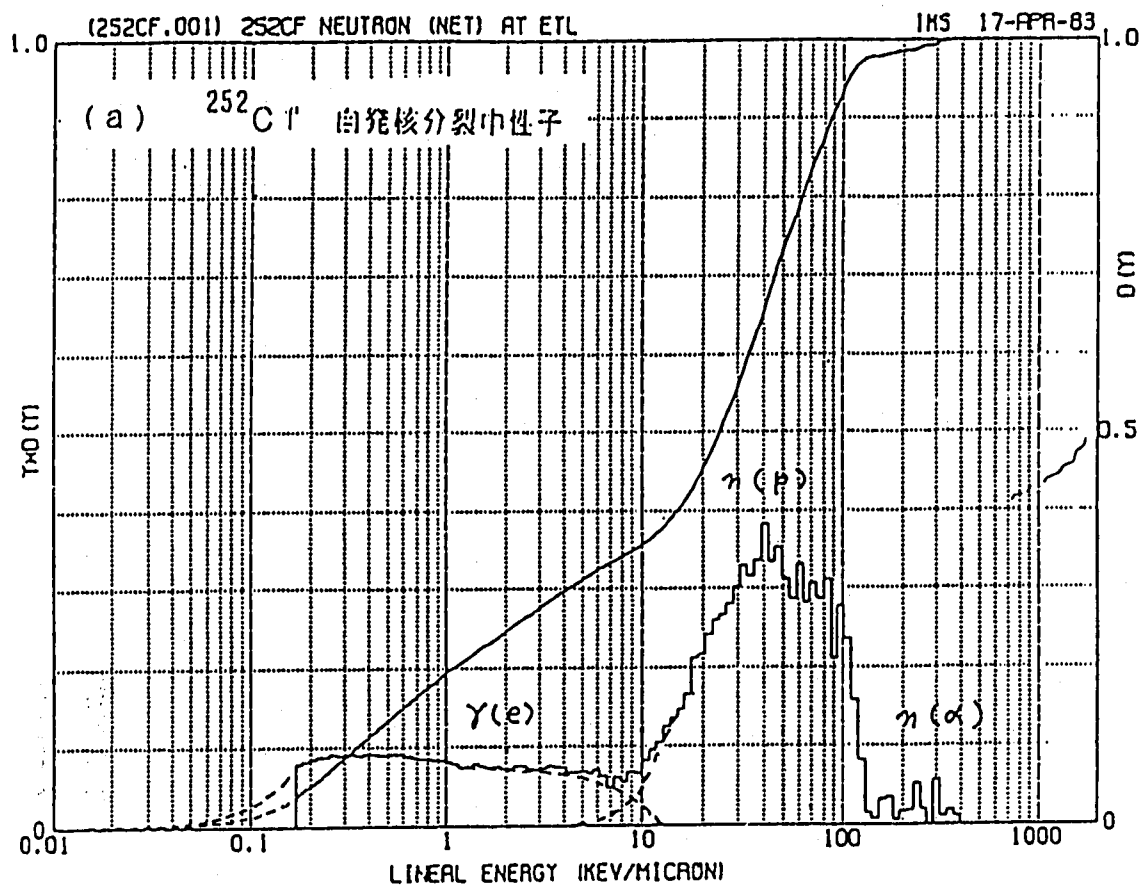


yスペクトルの解析方法

D(L) を測定する。

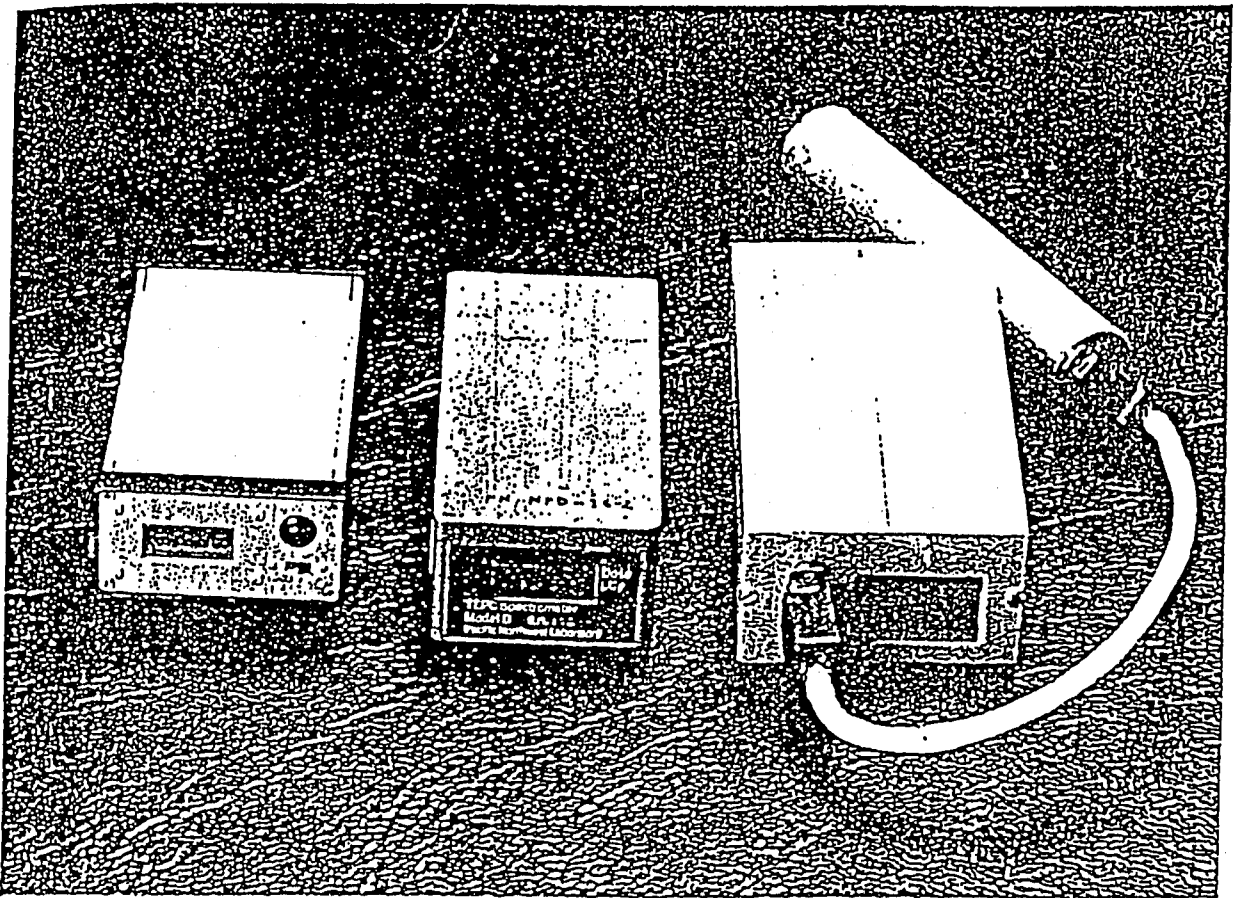
$$H = \int QF(L) D(L) dL$$

より H を求める。



R1中性子による γ の線性分布 ($d(\gamma)$)

Portable TEPC



Electronic Dosimeters that Use TEPCs for Detecting Radiation

344>ネIL (QF=1, 9, 15)

Recombination

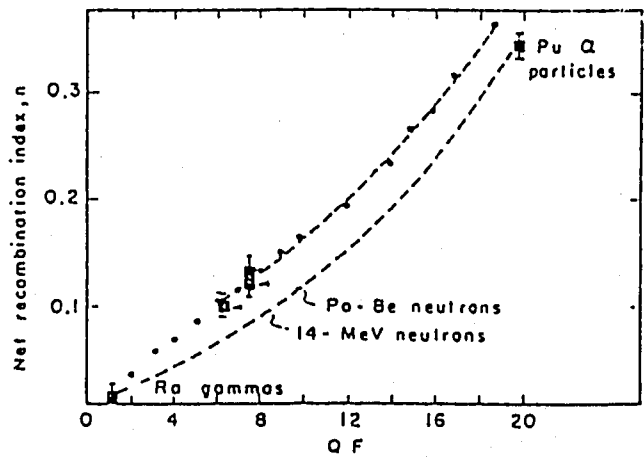
Chamber

$$i = kV^n$$

(ガス 10気圧)

nが QF の関数
とされる = ことから QF
が求められる。

$$H = D \cdot \overline{QF}$$



XBL709-3833

Fig. 2.5. Response of a high pressure parallel-plate recombination chamber as a function of quality factor. \bullet — \bullet shows the normalized response predicted from Juffé theory. — shows the response to mixed points (after Sullivan and Baarli).

減速型検出器のパルス場での内題点

(1) ガンマバーストによる
バックアップパルスの
除去

(2) 中性子バーストによる
パルスの数之落し

中性子が減速核散する
見かけ上中性子パルスの時間
中が引の10%程度の効果を示し
比較的数之落しが少ない。
熱中性子拡散時間は $\sim 180\mu s$
長いのを中性子が入射後
IT測定の時間 T は入射
パルスに ~ 10 倍に依存しない。

$$\frac{R}{R_0} = \frac{f t}{f t - R_0 \tau}$$

R: 真の計数率
R₀: 測定 (= IT) 計数率
f: 透過し得る中性子
t: 検出器の時間
 τ : 不感時間

$$\frac{dR}{dt} = \frac{R}{t_d} e^{-t/t_d} \quad t_d: \text{拡散時間}$$

$$R_0 = \frac{f \cdot t_d}{\tau} \left(1 - e^{-\frac{R \cdot \tau}{f \cdot t_d}} \right)$$

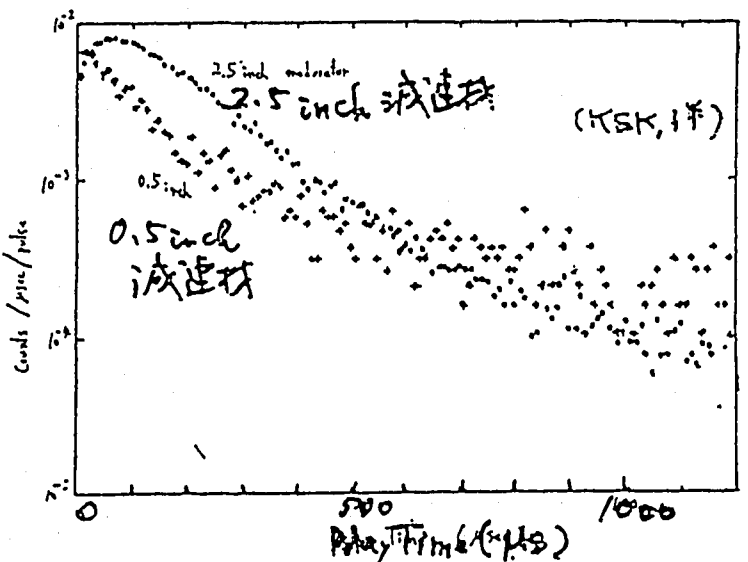
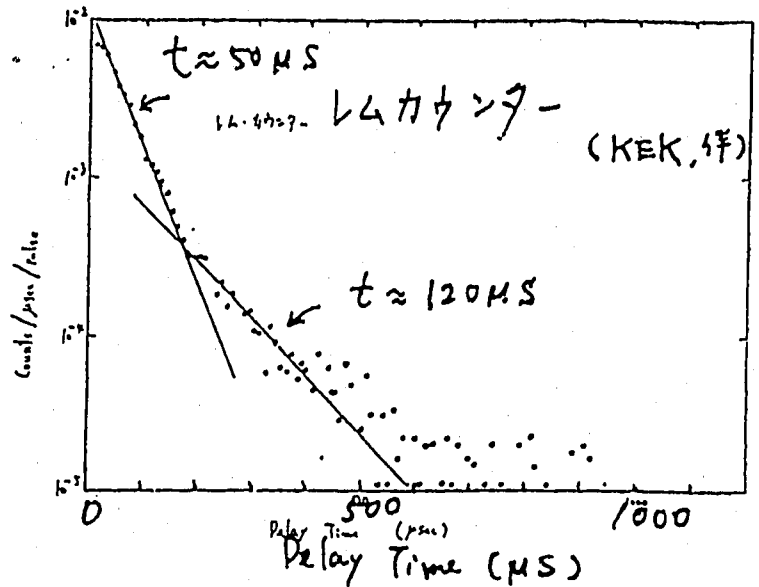
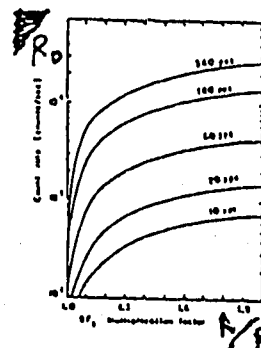


図1 時間5分



$\tau = 2 \mu sec$
 $t_d = 300 \mu sec$

6.3cm厚減速材
(Patterson)

放射化検出器 - γ 線測定用, 中性子測定用

をまとめている。

II. 放射化検出器として使用可能な光核反応

全般的な光核反応に関するデータはすでに文献⁽²⁾⁽³⁾に集められているが、 γ 線のスペクトルを求める放射化検出器として使用できる反応は、およそ次の条件を満たさなければならない。

- (1) 同位元素存在比が大きいこと。
- (2) 常温で固体状のものが得られること。

(3) 反応生成核の半減期が約10分以上約100日以下であること。

(4) 反応生成核が γ 線を放出し、その強度が強く、かつ分岐比が既知であること。

また、序論に述べたように、中性子が共存する場で γ 線を測定する場合には、もう1つの条件を満たさなければならない。いま1種類以上の安定同位元素をもつ核Aを考えると Table 1 に示すような競合する反応が起って、同一の放射性核種を生成する。

Table 1 Competing photonuclear and neutron reactions producing the same isotopes¹

ターゲット核 生成核	$^{m-1}_{z-1}A$	$^{m-1}_zA$	m_zA	$^{m+1}_zA$	$^{m+2}_zA$
$^{m-1}_zA$	(n, γ)	(γ, γ') \downarrow (n, n')	$(\gamma, n) \leftrightarrow (n, 2n)$	$(\gamma, 2n) \leftrightarrow (n, 3n)$	$(\gamma, 3n)$
m_zA		(n, p)	$(\gamma, p) \leftrightarrow (n, np)$ \downarrow (n, d)	$(\gamma, np) \leftrightarrow (n, nd)$	$(\gamma, t) \leftrightarrow (n, nt)$
$^{m+1}_zA$	$(\gamma, 2p) \leftrightarrow (n, ^3He)$ \downarrow $(n, ^3He)$	$(\gamma, ^3He) \leftrightarrow (n, \alpha)$ \downarrow (n, α)	$(\gamma, \alpha) \leftrightarrow (n, n\alpha)$		

¹ mは質量数, zは原子番号, 矢印は競合する反応を示す。

制動放射X線のスペクトルを測定する場合を考えてみよう。エネルギーEで加速された荷電粒子がターゲットに当たると、エネルギー0からEまで分布した制動放射X線が生じ、そのX線の光核反応により光中性子が発生する。この光中性子のエネルギーはX線のエネルギーに比べてターゲット物質の光核反応のしきいエネルギー(中性子の束縛エネルギー)約10数 MeV だけ低い値をもっている。その結果、この場に γ 線検出器をおいて照射した場合の放射化検出器中でおこる光核反応に対する中性子核反応の寄与を考えると、後者は中性子核反応のしきいエネルギーにターゲット物質の光核反応のしきいエネルギー約10数 MeV を加えたしきいエネルギーを實質上もっていることになる。 $(\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, \alpha)$ 反応はしきいエネルギーが数 MeV ~ 10 数 MeV であり、 $(\gamma, np), (\gamma, t), (\gamma, ^3He)$, $(\gamma, 2n)$ などの反応は10 数 ~ 20 数 MeV である。また、 $(n, n'), (n, p), (n, \alpha), (n, t), (n, ^3He)$ 反応は数 MeV のしきいエネルギーを持ち、 $(n, 2n), (n, np), (n, n\alpha), (n, nt)$ などの反応は10 数 MeV 以上の高いしきいエネルギーを持っている。したがって、断面積の大小の比較を無視してしきいエネルギーの違いからだけ判断すると、Table 1 に基いて中性子共存場で使

用可能な光核反応としては、次のものを挙げる事ができる。

- (5) i) 安定同位元素が1種類の時
 $(\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, t), (\gamma, 2n), (\gamma, \alpha)$
- ii) 安定同位元素が2値以上の時
 - n) 最小質量数をもつ同位体
 $(\gamma, n), (\gamma, p), (\gamma, t), (\gamma, 2n), (\gamma, \alpha)$
 - b) 最大質量数mをもつ同位体で、すぐ下の同位体の質量数が(m-2)であるもの
 $(\gamma, p), (\gamma, \alpha)$

以上の5つの条件を満たす光核反応のうちで、断面積(励起関数)のデータが存在するものの一覧表を Table 2 に示す。同位体存在比, 半減期, γ 線エネルギーと強度比などは文献(4)からとった。断面積のデータは文献(2)(3)をもとにして、もれている分や新しいものをつけ加えて、与えられた断面積データのエネルギー範囲とともに表に示している。エネルギー範囲の閉のThは、しきいエネルギーを示す。文献名は Table 5 にまとめているが、その名前は年号と最初の著者の頭文字2字とからなっている。また、Remarksには同一核を生成する競合反応とそのしきいエネルギーの値を示している。このしきいエネルギーの値は文献(5)

ハルストシメトリー

レムカウンターによる逆同時計数法による中性子
線量測定

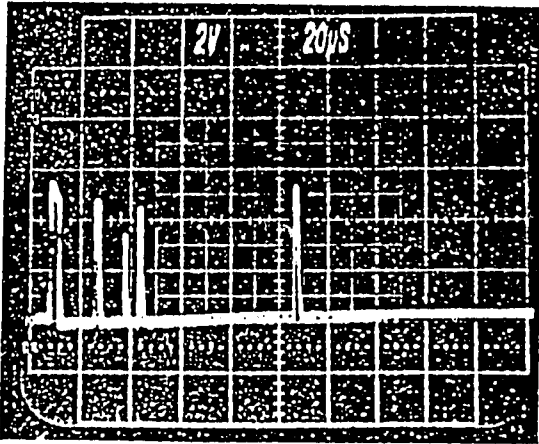


Photo. 1 A typical waveform of rem-counter exposed to pulsed and mixed radiations. Only the first pulse is due to burst X-rays, and the rest corresponds to neutron pulses. A time lag of neutron pulses is attributed to slowing-down and diffusion in a moderator rather than the flight time.

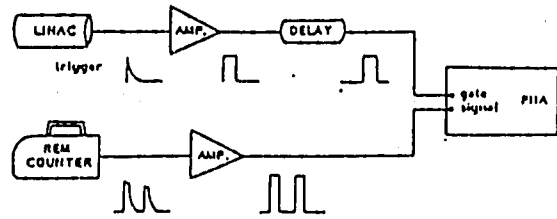


Fig. 1 Block-diagram of experimental set-up.

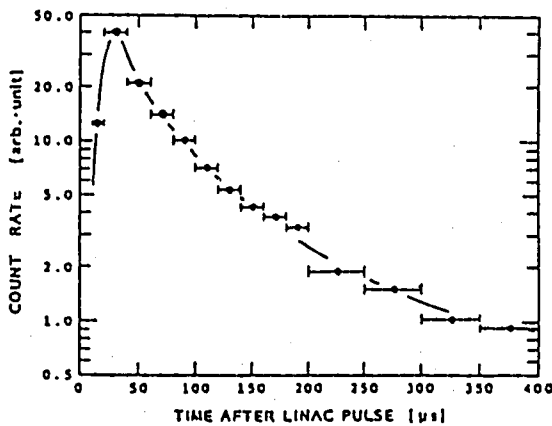


Fig. 2 Time distribution of neutron pulses of rem-counter obtained by coincidence counting. Neutron pulses are rarely generated within about 15 μ s.

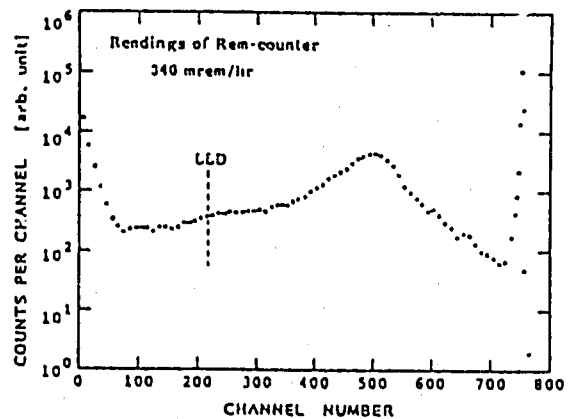
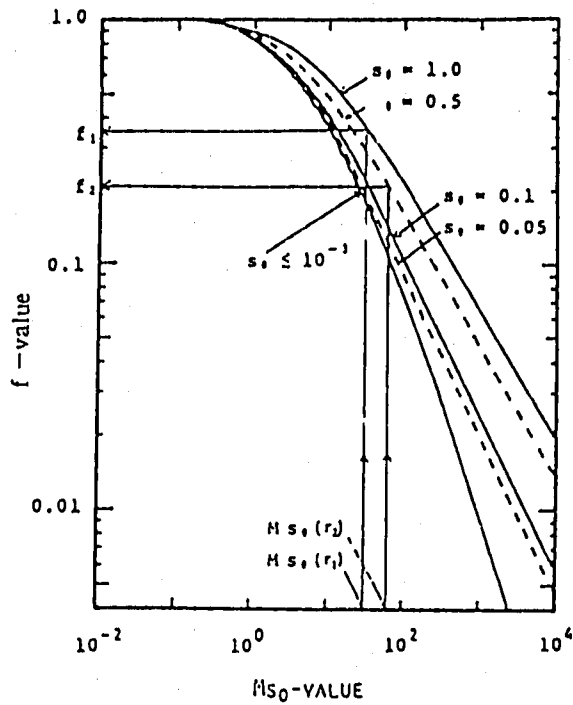
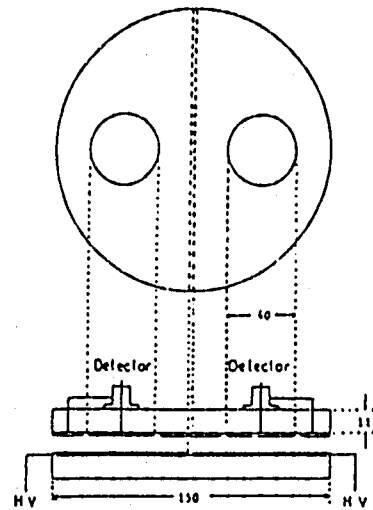


Fig. 3 A typical pulse-height spectrum of rem-counter. The abscissa corresponds to the pulse height. A sharp peak in the right side is due to burst X-rays, and the rest to neutrons.

パルスドレジャー



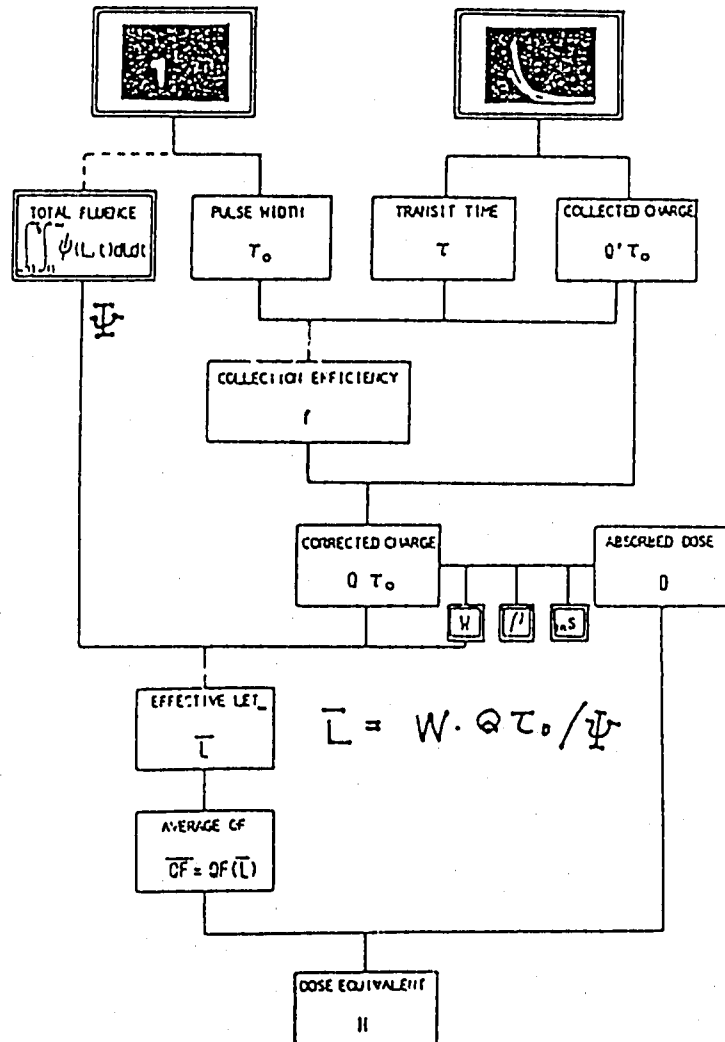
イオン収集効率 (f 値) とパルス当りの線量との関係。パラメータはパルス巾。



Abreast-Type Ionization Chamber

アブレスト型電離箱

電圧をかえるヒイオンモ極内
通過時間てが変リ、その比て不変。



放射線計測法 (大線量・ハルシ場)

- ・ 電子 エネルギースペクトル : magnetic spectrometer + Faraday Cup
吸収線量 : TLD, アラニン線量計
- ・ γ 線 エネルギースペクトル : (Y, X) 放射化検出器
(判別放射線) 吸収線量 : TLD, 電離箱
- ・ 中性子 エネルギースペクトル : (n, X) 放射化検出器
(光中性子) 吸収線量 : LETスペクトロメータ, 電離箱
L4カウンタ

線量当量評価法

(1) スペクトロメータ法

$$H = \int \phi(E) \cdot K(E) dE$$

K: $\text{rC} \cdot \text{E}^{-1}$ 線量当量換算係数

(2) 吸収線量法

$$H = \int D(L) \cdot Q(L) dL$$

$$H = D \cdot \bar{Q}(L) \quad D = \int D(L) dL$$

(3) L4カウンタ法

応答関数を $K(E)$ に一致させる方式

電子エネルギースペクトル : magnetic spectrometer + Faraday Cup

電子吸収係数 : TLD, プラズマ線量計

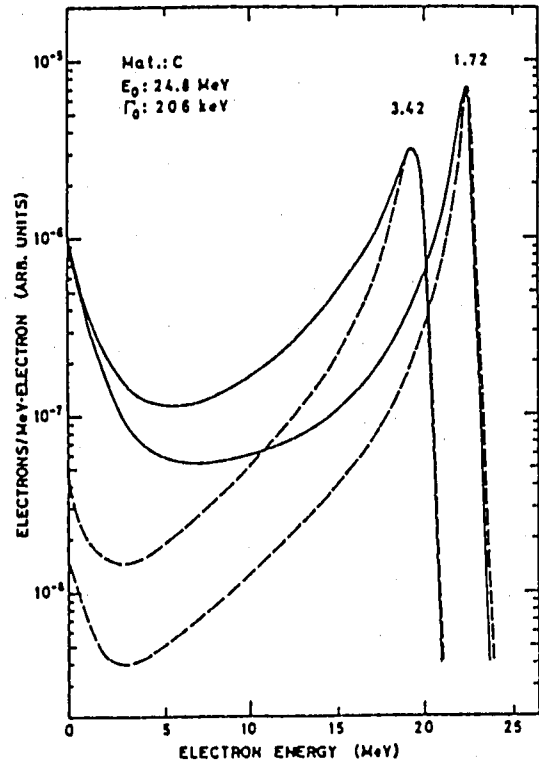
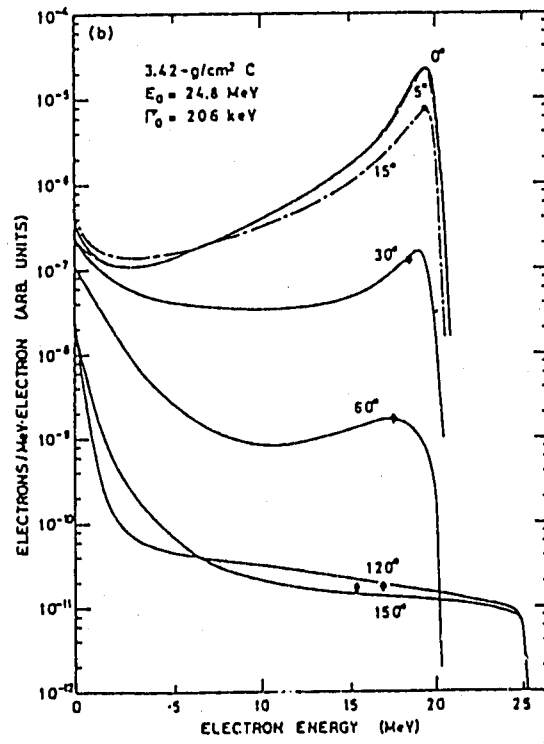
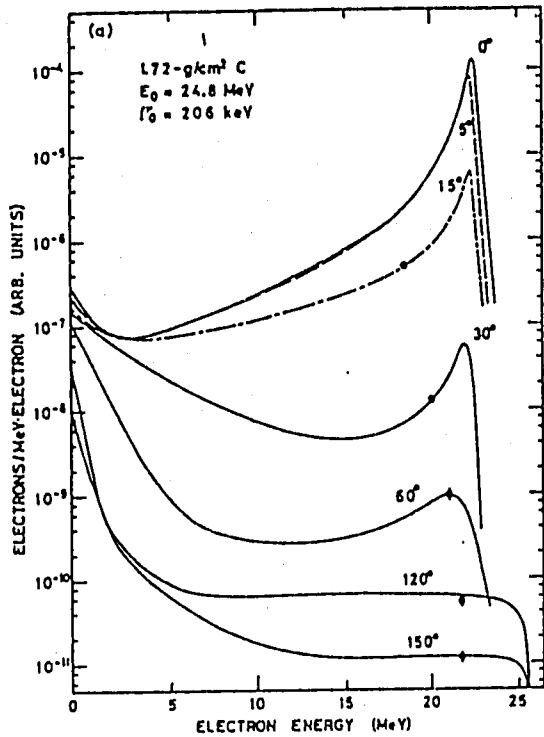


FIG. 3. Composed total energy spectra for C bombarded with 24.8-MeV electrons. Figures attached to curves are t_x in g/cm^2 units. Dashed curves are $f(E,0)$ which are normalized so that peak heights agree with those of corresponding $F(E)$.

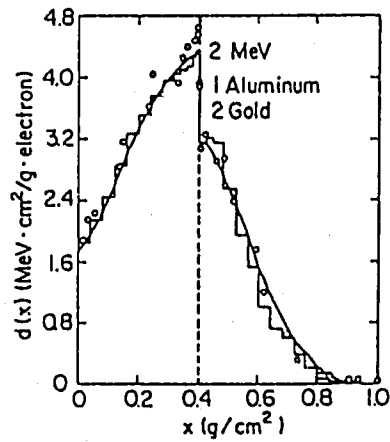
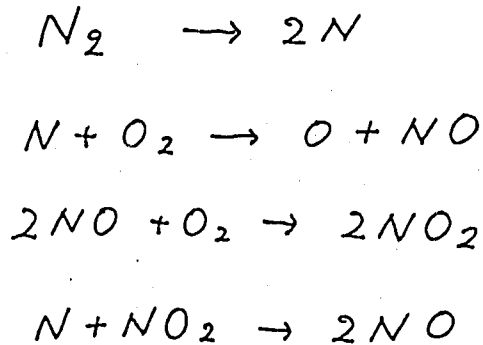


Fig. 4. Depth-dose profile for 2-MeV electrons normally incident on an aluminum-gold slab absorber (case No. 2 of Table I). Points: experimental data (ref. 3), histogram: Monte Carlo result (ref. 3), curves: present algorithm.

大線量放射線による NOx の生成



常温では NO₂ が大部分を占める

		m. p./°C	b. p./°C		
	<u>N₂O</u>	N=N-O	-91	-88	常温で安定。高温では酸化剤として作用し、金属や炭素と反応する。毒性、刺激性は弱く安全である。
毒性 ○	<u>NO</u>	N=O	-164	-152	酸化剤、還元剤として働く。金属を高価で酸化して酸化物をつくり、炭素、リンもNO中で燃焼する。多くの金属とニトロシル錯体をつくる。常磁性体である。毒性が強く、生体内では、血液中に入り中枢神経系に障害を及ぼす。
	N ₂ O ₃		-101	3	気体は赤カッ色で液体および気体は褐色である。気体では、1気圧、25°Cで10.5%がNOとNO ₂ に解離している。水溶液中では硝酸とNOになる。
毒性 ○	<u>NO₂</u>		(液体、固体ではN ₂ O ₄)		NO ₂ の固体、液体、気体(常温)では、2分子会合してN ₂ O ₄ として存在するが化学的性質はN ₂ O ₄ と同様である。気体は赤カッ色、Cu, Co, Niなどは常温でNO ₂ を吸収し、高温では酸化物となる。Hg, Pbとは常温で硝酸塩をつくる。水と反応して亜硝酸および硝酸をつくる。NO ₂ は毒性が強く主に肺組織に障害を与え、呼吸器抵抗低下の原因となる。
	N ₂ O ₄		-11.2	21.1	
	N ₂ O ₅		41	45	吸湿性で水に溶けて硝酸になる。常温でもゆっくりとNO ₂ とO ₂ に分解する。強い酸化剤でベンゼンをニトロ化する。

単色γ線の生成 陽電子飛行中消滅

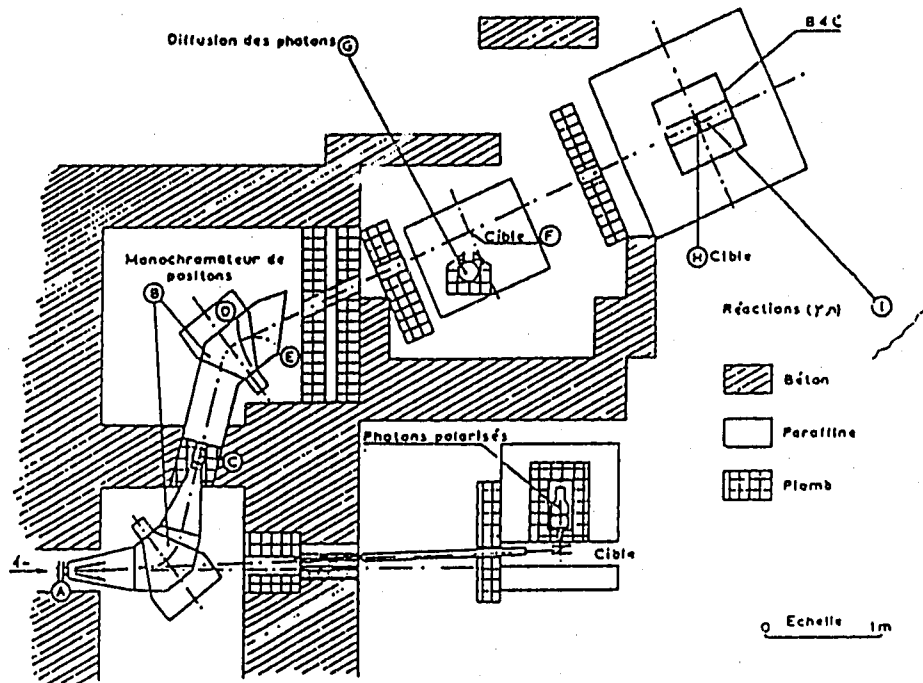


Fig. 1. Ensemble expérimental.

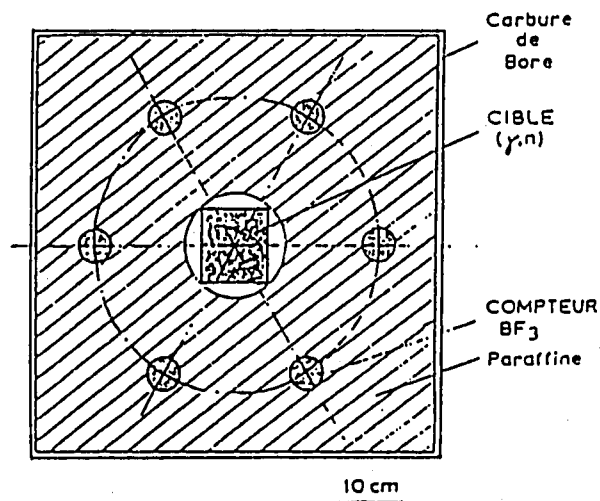


Fig. 2. Coupe du détecteur de neutron.

TABLEAU I
Épaisseur des cibles étudiées

Cible	Bi	Pb ^{a)}	Au	Ta	La	Ce	Cu
Épaisseur (g/cm ²)	16.71	18.34	10.48	13.35	12.46	10.87	11.02

^{a)} Dans la cible de plomb, la plus épaisse, la proportion de photons Compton par bande de 1 MeV, par rapport au pic monochromatique de 16 MeV, est de l'ordre de $2 \cdot 10^{-2}$ entre 10 et 15 MeV.

大電流電子ビームによる損傷評価

核融合プラズマ中には迷走電子 (数10 MeV にも達する) がプラズマ外一壁をたどり損傷を起す大きな問題がある。

核融合炉での考慮工に用いる材料

- Vessel (外一壁 + 内)
 - セラミック — SiC
 - V-Cr-Ti, V-Ti-Si 合金
 - Steel
- 絶縁材
 - Al_2O_3 , Si_3N_4 — セラミック
- フリット
 - Li_2O , Li_4SiO_4 , Li_2ZrO_3 (固相)
 - Li, FLiBe, LiPb (液相)
- フランケット
 - V 合金 (V-5Ti-5Cr)
 - Li

代表的な長寿命核種

100万kWeの軽水炉を1年向運転し、その時生成される量であり、使用済燃料の再処理に伴い発生する廃棄物に含まれる。

核種	半減期 (年)	生成量 (kg)	
^{90}Sr	28.1	18.1	—
^{137}Cs	30.1	41.4	—
^{129}I	1.6×10^7	—	4.4
^{99}Tc	2.1×10^5	28.3	19.0
^{235}U	7.04×10^8	—	0.98
^{238}U	4.47×10^9	—	130
^{237}Np	2.14×10^6	16.6	11.0
^{239}Pu	2.44×10^4	—	0.66
^{241}Am	4.33×10^2	1.2	6.4
^{243}Am	7.40×10^3	2.8	2.1
^{244}Cm	1.81×10	0.63	0.49

研究テーマ

- (1) ^{238}U , ^{237}Np , ^{235}U , ^{239}Pu の光核分裂
反応による核変換量の実験
- (2) 天然 Sr, Cs 体系中の光核反応
生成核種分布の測定
- (3) ^{137}Cs の光核反応断面積の測定
 - ・ 核反跳によるキャッチャー-フイル法
 - ・ γ - γ 同時計測法
- (4) Sr 濃縮同位体の光核反応断面積
の測定及び光核反応断面積の
同位体依存性

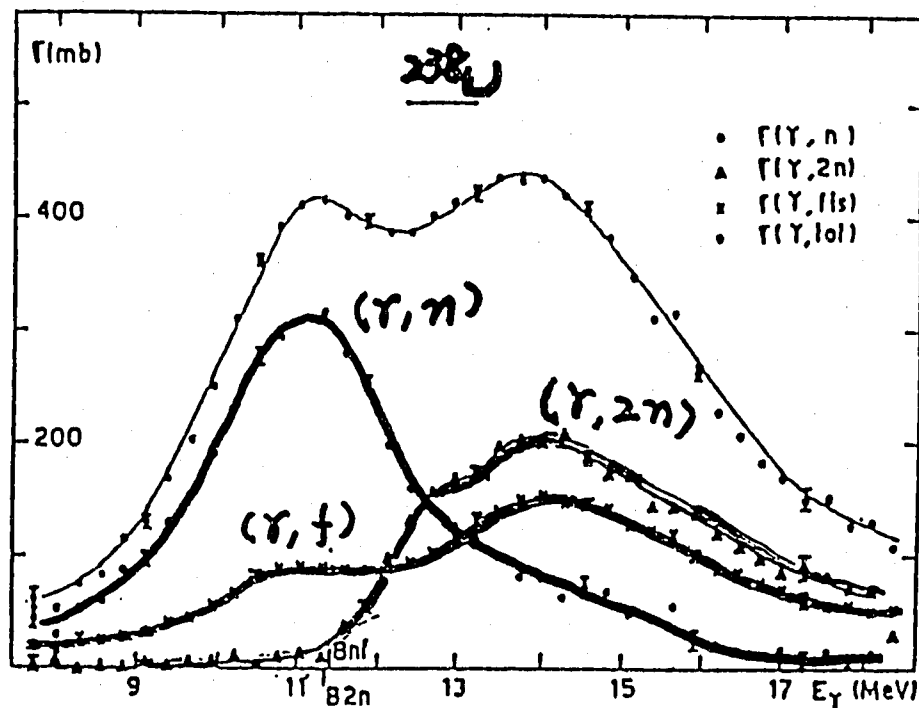


Fig. 4. Partial and total photoneuclear cross sections $\sigma(\gamma, n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$, $\sigma(\gamma, f)$ and $\sigma_{\text{tot}} = \sigma(\gamma, n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, f)$ of ^{238}U .

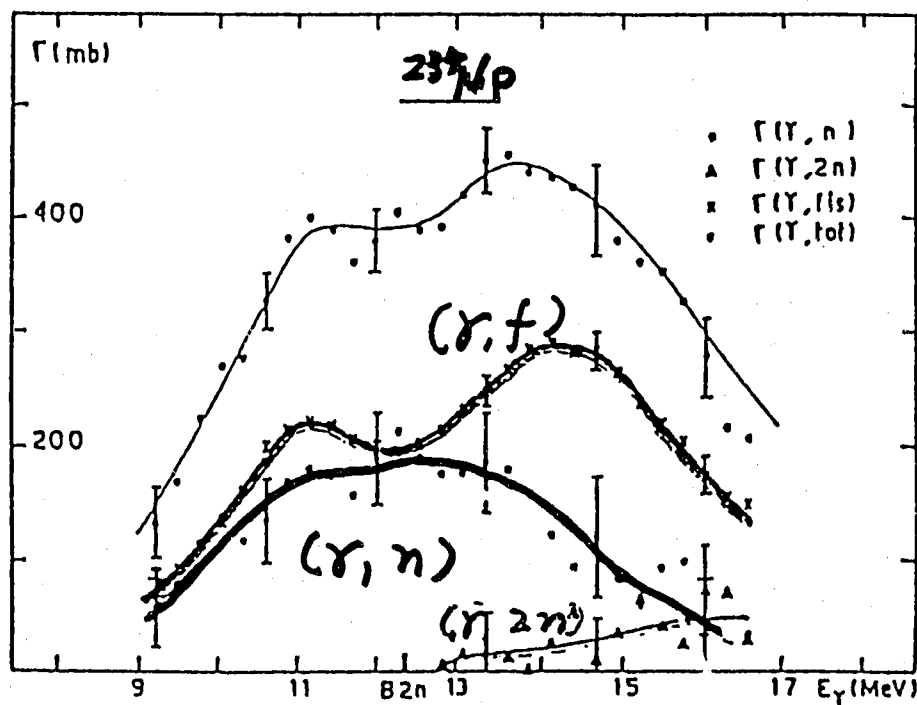


Fig. 7. Partial and total photoneuclear cross sections $\sigma(\gamma, n)$, $\sigma(\gamma, 2n)$, $\sigma(\gamma, f)$ and $\sigma_{\text{tot}} = \sigma(\gamma, n) + \sigma(\gamma, 2n) + \sigma(\gamma, f)$ of ^{237}Np .

- ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{237}Np の (γ, f) 反応断面積核変換量の測定

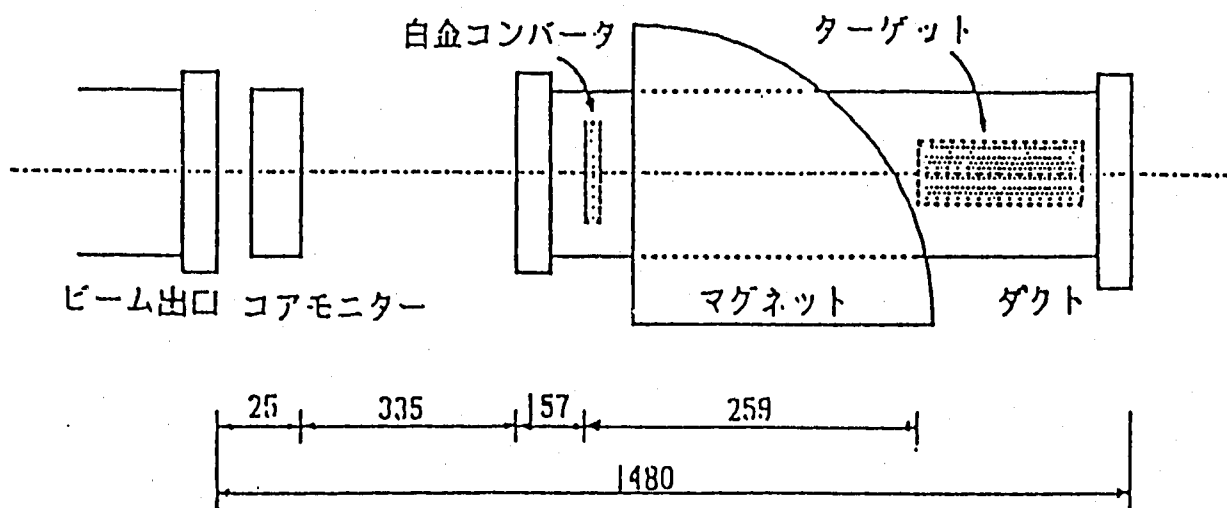
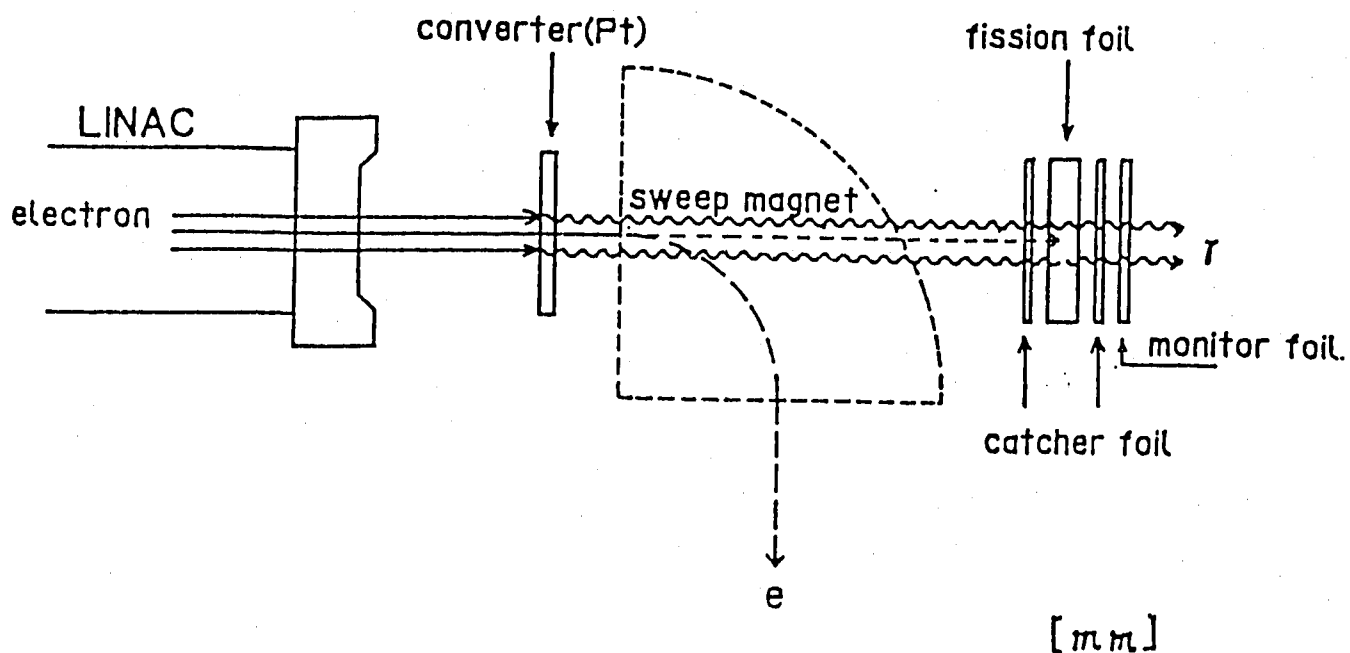


Fig. 2 - 1 光核分裂反応実験配置図 (旧ビームライン)

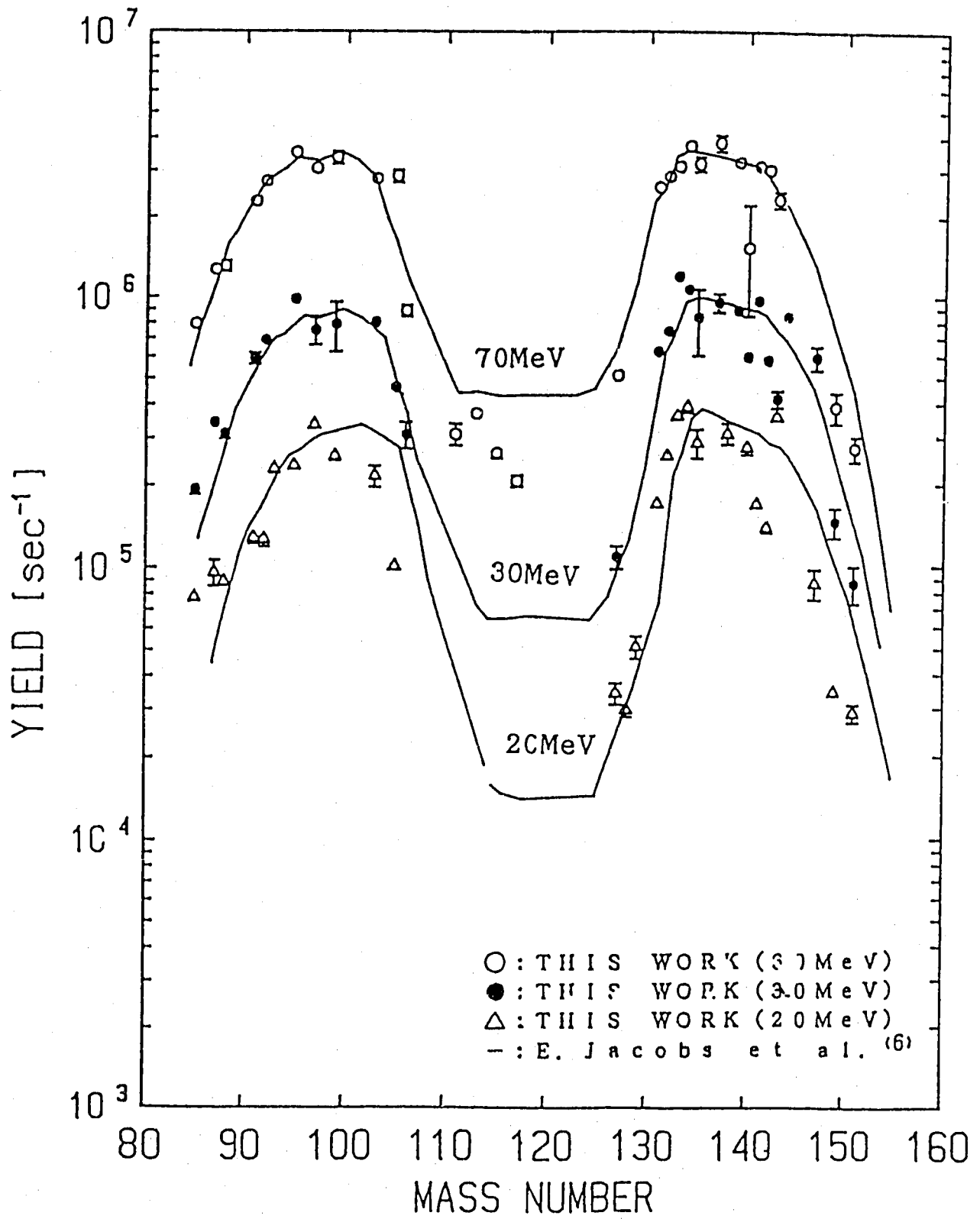
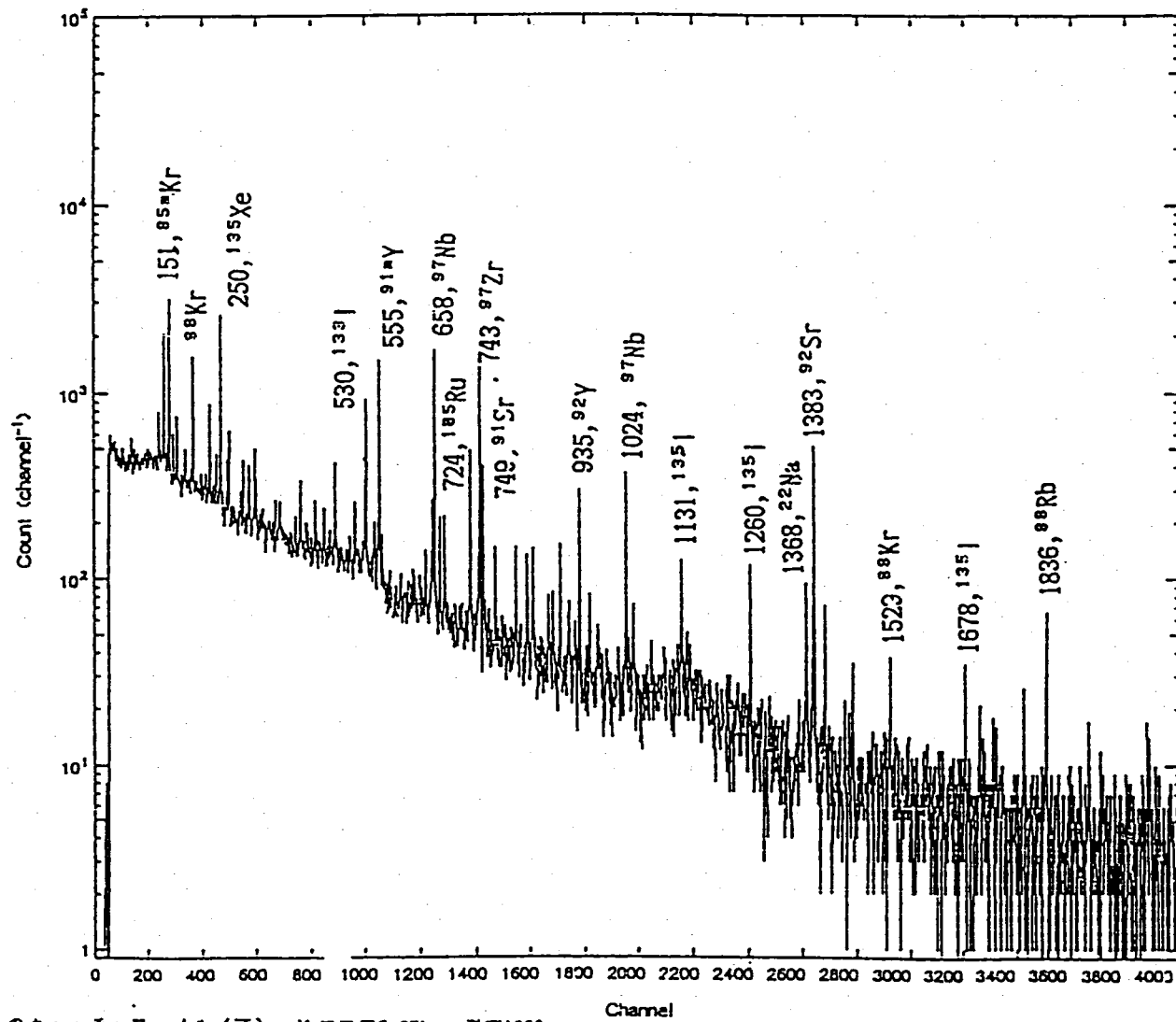


Fig. 2 - 4 ²³⁸Uの (r, f) 反応による質量収率分布

TABLE 2 ターゲット

ターゲット	濃縮率 [%]	ターゲットの量 [μ Ci]	使用した実験
^{235}U	99.15	5.94×10^{-5}	30MeV, 60MeV
	93.18	4.14×10^{-4}	60MeV (化学分離用)
^{238}U	99.959	2.69×10^{-2}	20MeV
	99.9357	2.36×10^{-2}	30MeV
	99.9357	2.44×10^{-2}	60MeV, 60MeV (化学分離用)
^{237}Np	99.3	2.12×10^{-2}	20MeV
	99.3	4.32×10^{-2}	30MeV, 60MeV
^{239}Pu	99.23	1.66	30MeV, 60MeV

^{238}U ターゲットのみ直径12.7mm、厚さ0.0254mmの金属箔である。他の3核種のターゲットはニッケル板の上に直径12.7mmで蒸着してある。



実験1のキャッチャフォイル(薄)、冷却時間5.87hr、測定1900s
Fig. 4 Measured gamma-ray spectrum of fission products deposited on the aluminum catcher foil contacted on a ²³⁸U foil bombarded by the 30 MeV bremsstrahlung

- 入射光子束の算出

$^{197}\text{Au} (\gamma, n) ^{196}\text{Au}$ 反応の放射能

$$A = N_T \int_{E_{th}}^{E_0} \sigma(E) \phi(E) dE$$

$$\phi(E) = C \psi(E)$$

C : 入射電子数

$\psi(E)$: 電子1個による制動放射線束
EGS4による計算

- 核変換量

$$\begin{aligned} \Delta m &= m \int_{E_{th}}^{E_0} \sigma(\gamma, n) \phi(E) dE \\ &= m \int_{E_{th}}^{E_0} \sigma(\gamma, f) \phi(E) dE \end{aligned}$$

- 核変換効率

$$E_f = \Delta m / [m S \cdot \int_{E_{th}}^{E_0} \phi(E) dE]$$

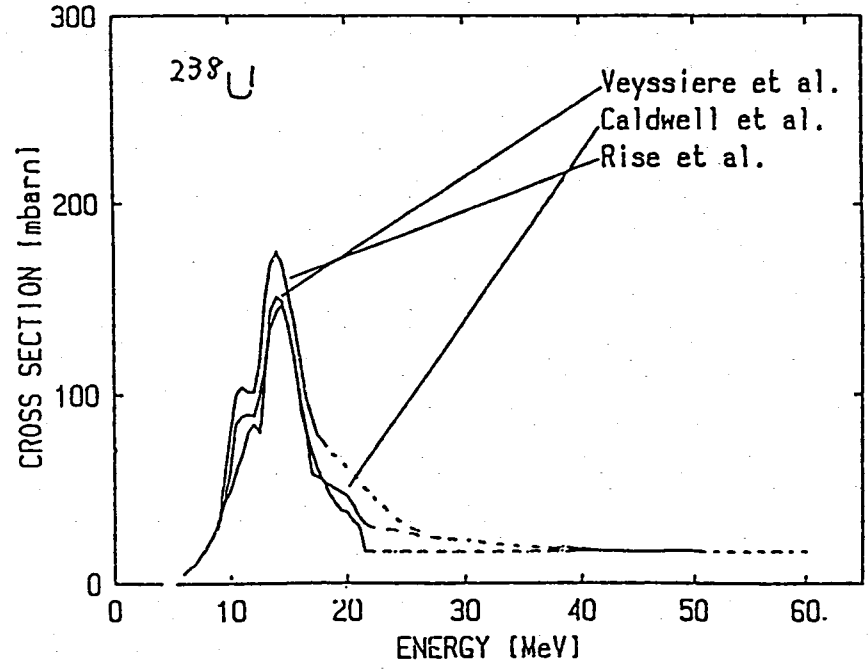
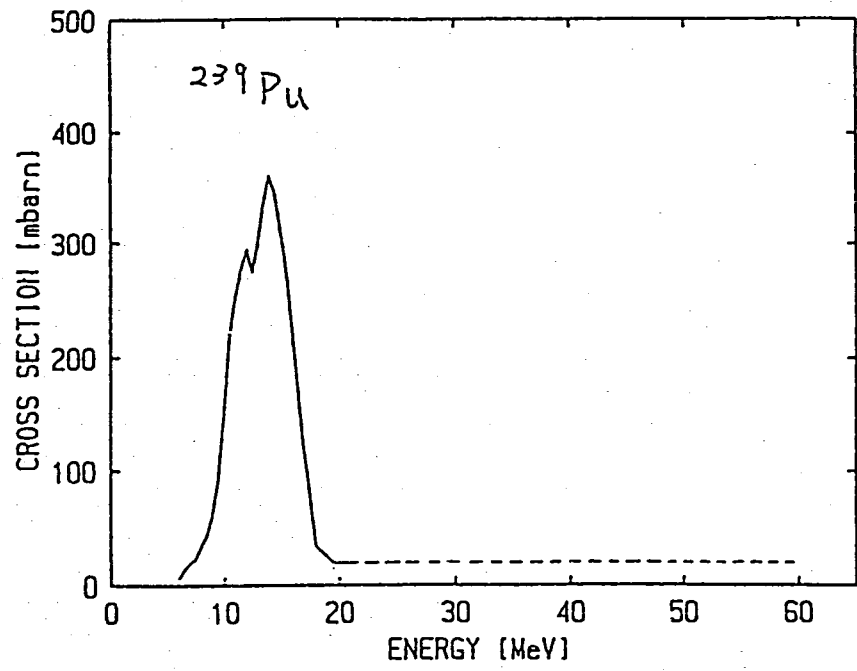
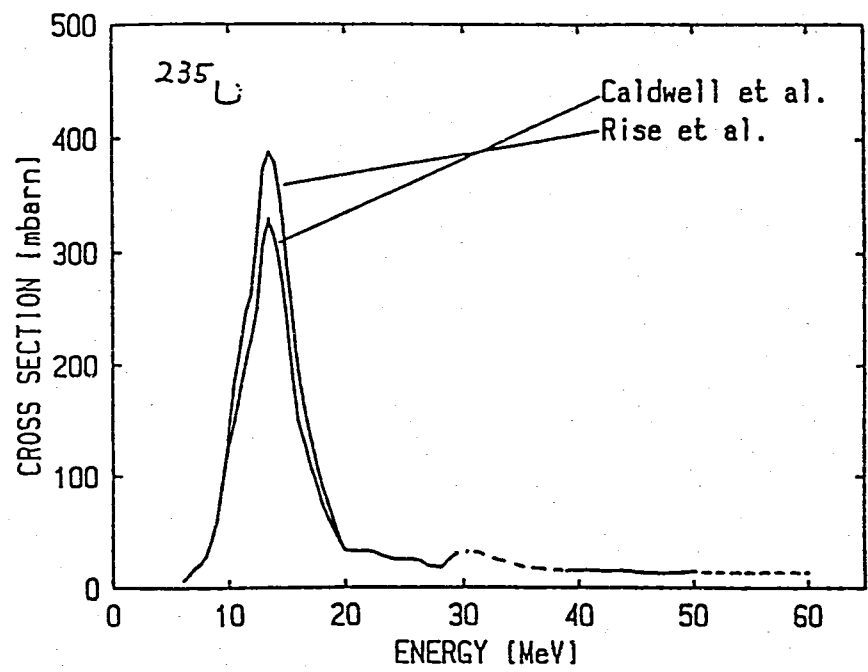
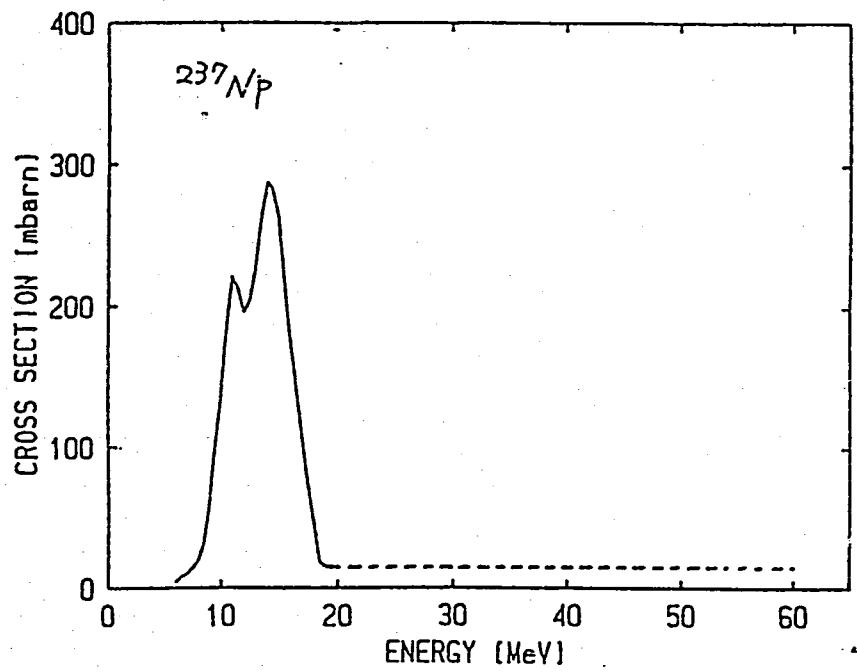
S : ターゲット面積

ターゲット	電子エネルギー E ₀ (MeV)	核変換量 Δ _m (g/s)		計算値/実験値	光子束 (>6MeV) φ (γ/cm ² ·s) × 10 ¹²	Δ _m / (mφS) (γ ⁻¹) × 10 ⁻²⁵
		実験値 × 10 ⁻¹⁷	計算値 × 10 ⁻¹⁷			
²³⁵ U	30	1.14	• 1.06 ^a	• 0.930	3.22	1.01
	30	1.14	0.909 ^b	0.797	3.22	1.01
	60	4.94	• 4.57 ^a	• 0.925	17.1	0.927
	60	4.94	3.95 ^b	0.800	17.1	0.827
²³⁸ U	20	172	• 192 ^b	• 1.12	0.469	0.359
	20	172	213 ^c	1.24	0.469	0.359
	20	172	249 ^a	1.45	0.469	0.359
	30	595	• 612 ^b	• 1.03	1.72	0.384
	30	595	643 ^c	1.08	1.72	0.384
	30	595	792 ^a	1.33	1.72	0.384
	60	2210	• 2160 ^b	• 0.977	6.74	0.352
	60	2210	2190 ^c	0.991	6.74	0.352
	60	2210	2720 ^a	1.23	6.74	0.352
²³⁷ Np	20	0.240	0.217	0.904	0.327	0.941
	30	0.504	0.470	0.933	1.65	0.799
	60	1.20	1.73	1.44	7.55	0.469
²³⁹ Pu	30	1.04	0.997	0.959	3.19	1.02
	60	4.79	3.51	0.733	13.8	0.961

光子数
φ(>6MeV)
γ/e⁻

} 3.88 × 10⁻³
} 1.23 × 10⁻²
} 5.80 × 10⁻²

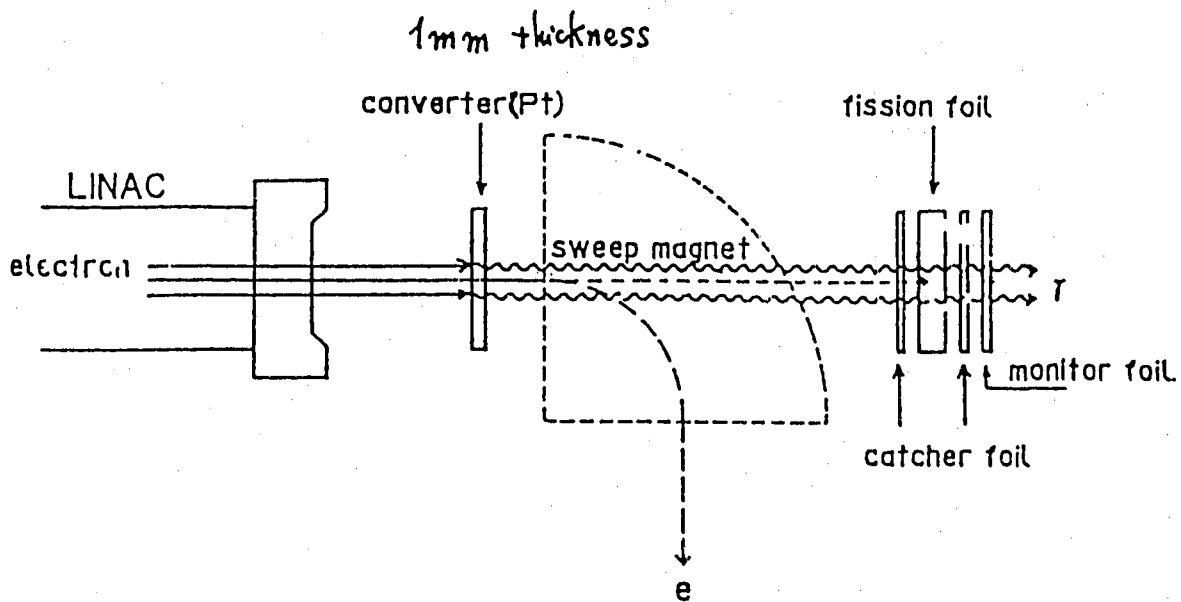
* S = (1.27/2)²π = 1.27 (cm²) : ターゲットの面積
 ** m : ターゲットの質量
 a Caldwellらのデータを用いて計算した核変換量
 b Riseらのデータを用いて計算した核変換量
 c Veyssiereらのデータを用いて計算した核変換量



天然 Sr, Cs 体系中の光子, 中性子分布の測定

炭酸ストロンチウム } 直径 18mm 長さ 200mm
 炭酸セシウム

$$\rho(\text{SrCO}_3) = 2.16 \text{ g/cm}^3 \quad \rho(\text{Cs}_2\text{CO}_3) = 3.24 \text{ g/cm}^3$$



○ 飽和放射能分布

$$A_s(x) = NC \int_{E_{th}}^{E_0} \sigma(E) \phi(E, x) dE$$

N : g -ゲート核原子数

C : 入射電子数

$\sigma(E)$: $(\gamma, n) + (\gamma, np)$ 断面積

$\phi(E, x)$: 制動放射 X 線スペクトル

E_{th} : 反応のしきいエネルギー

E_0 : 入射電子のエネルギー

○ X 線束

$$\Phi(x) = C \int_0^{60} \phi(E, x) dE$$

中性子束分布

発生中性子数 $Y_n(x) = N_A C \int_{E_{th}}^{E_0} \sigma(E) l_{th}(E, x) dE$

N_A : (γ, n) 反応のターゲット核原子数密度

$l_{th}(E, x)$: ある領域内の、 γ 線 differential track length

中性子スペクトル

$$\begin{cases} \phi_n (E \leq 3.5 \text{ MeV}) = \frac{E}{T^2} \exp\left(-\frac{E}{T}\right) \\ \phi_n (E > 3.5 \text{ MeV}) = E^{-\alpha} \end{cases}$$

T : 原子核温度 ($= 0.82 \text{ MeV}$)

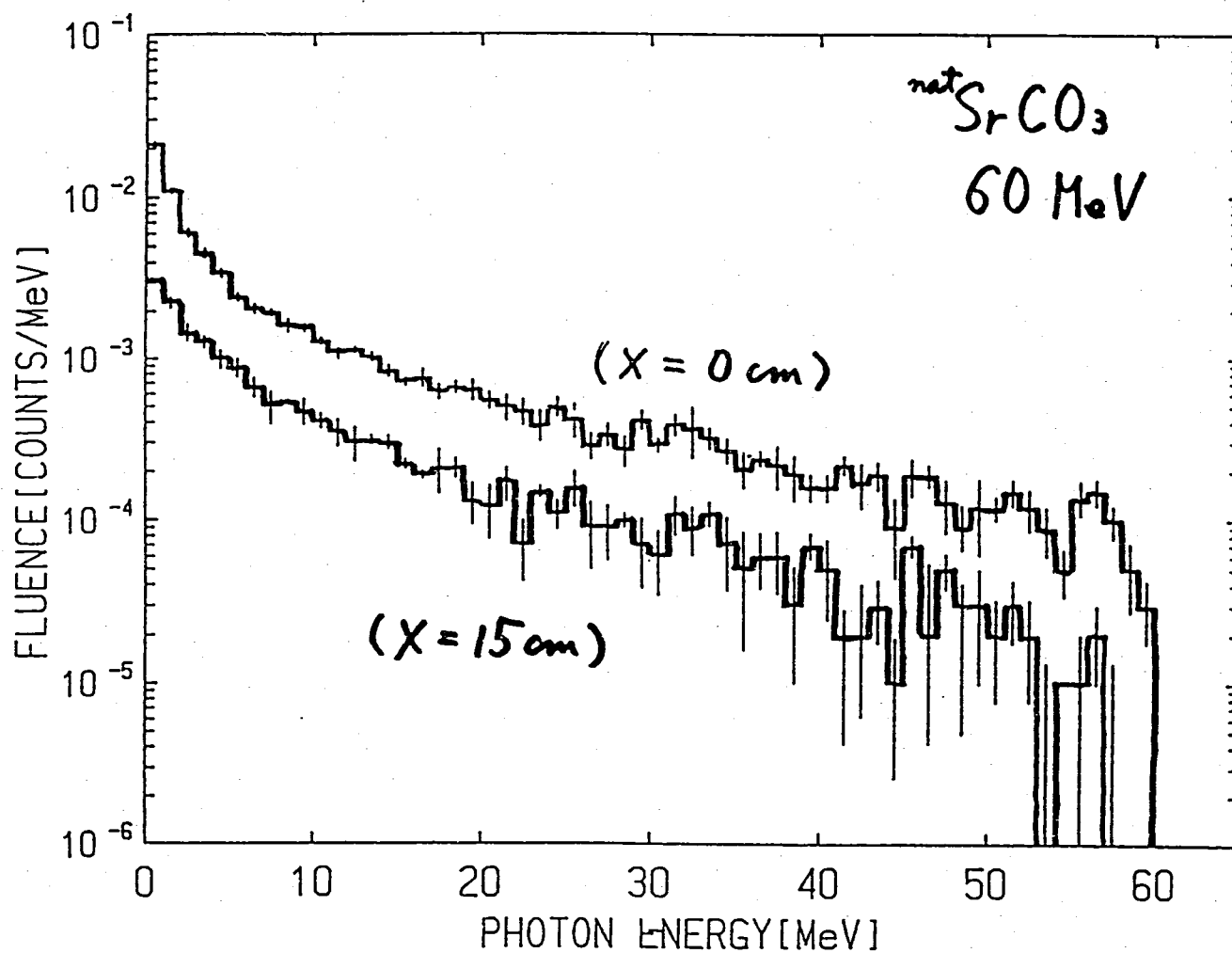
α : 定数 ($= 2.8$)

$\phi_n(E)$ 内の面積を $Y_n(x)$ で規格化し、
実際の中性子スペクトル $\Phi_n(E, x)$ を求める。

$$A_S(x) = N \int_{E_{th}}^{E_0} \sigma_n(E) \Phi_n(E, x) dE$$

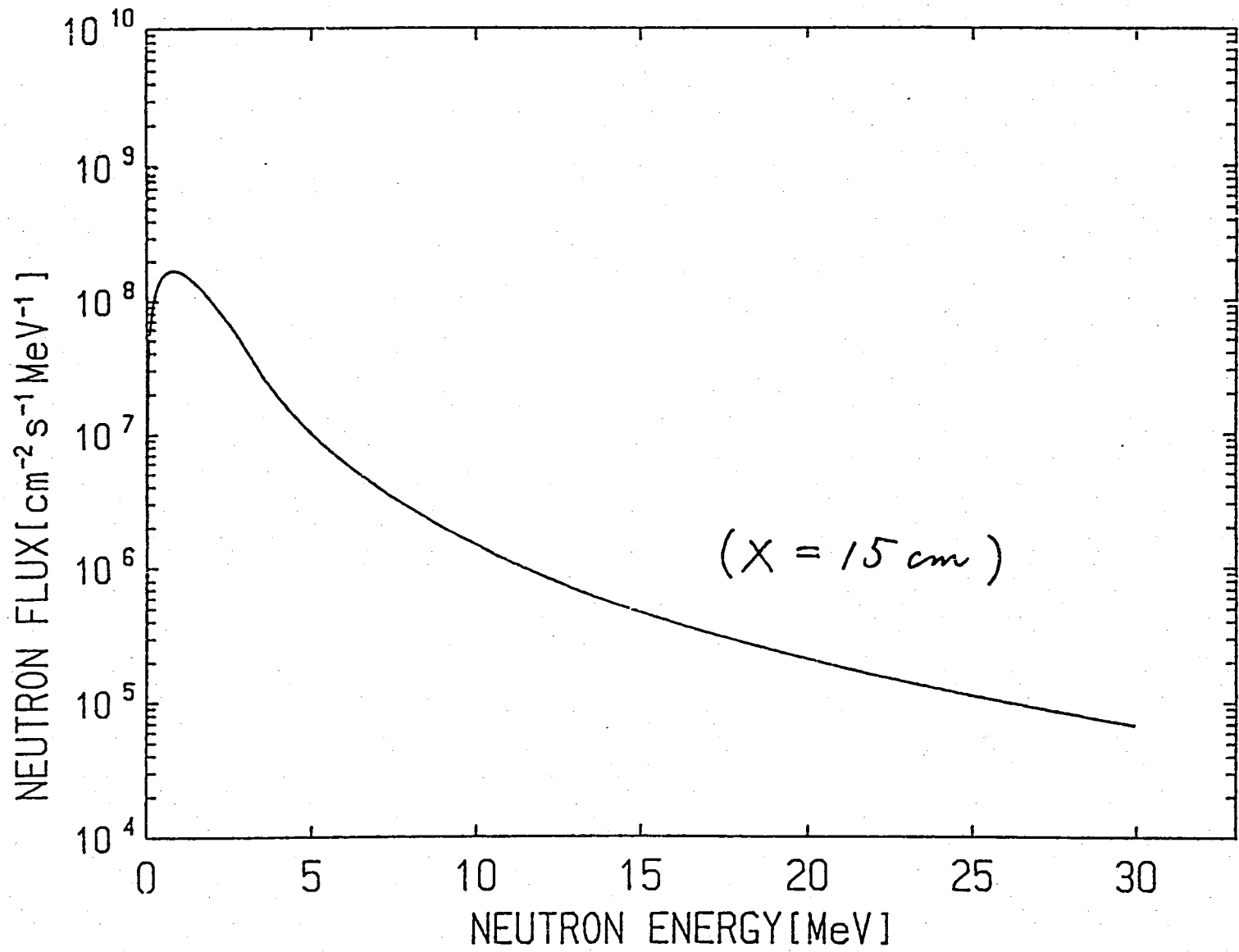
N : ターゲット核原子数

$\sigma_n(E)$: $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ 断面積

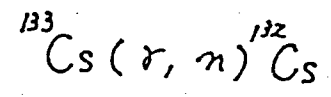
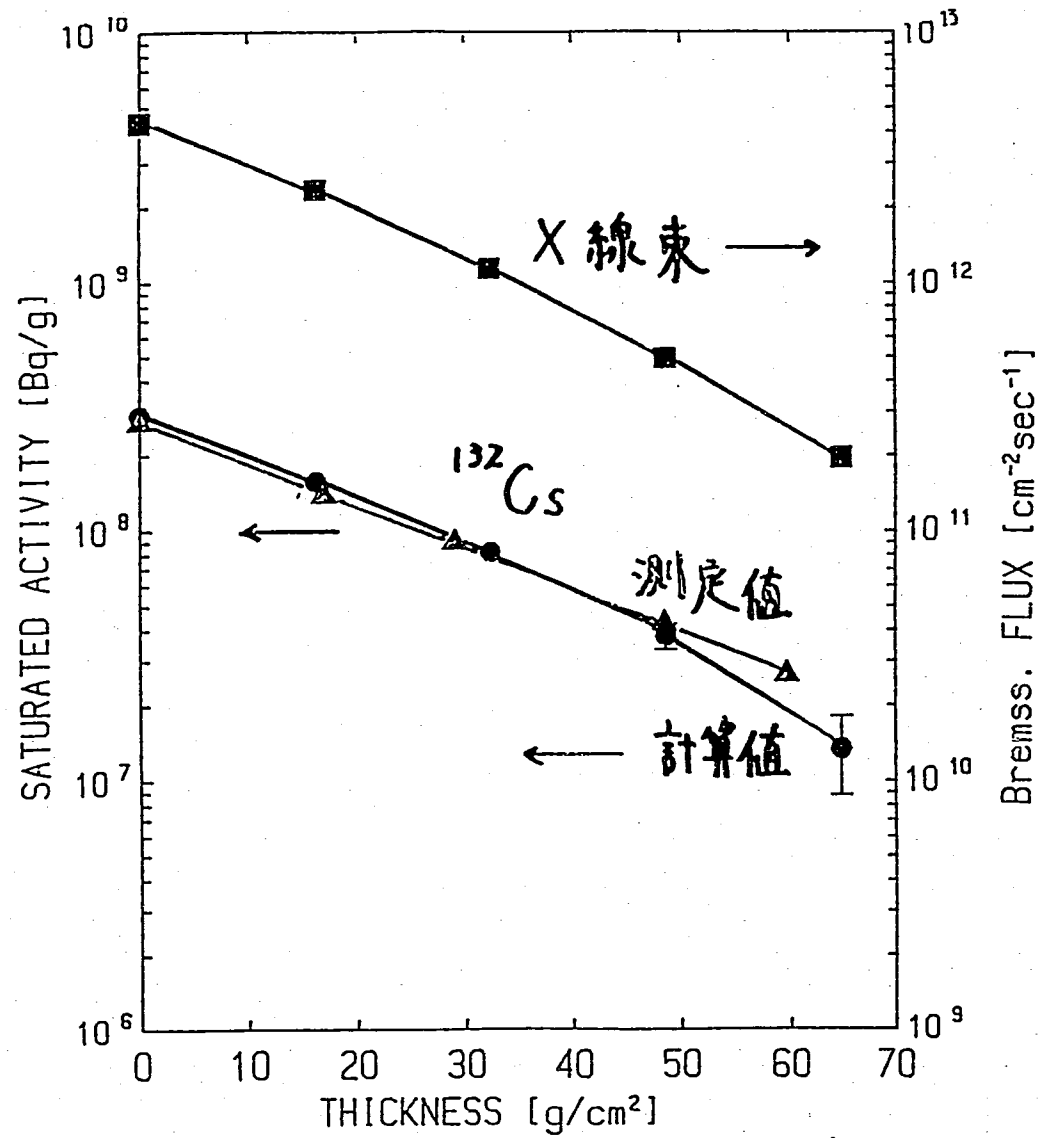


Bremsstrahlung Spectrum (60MeV)

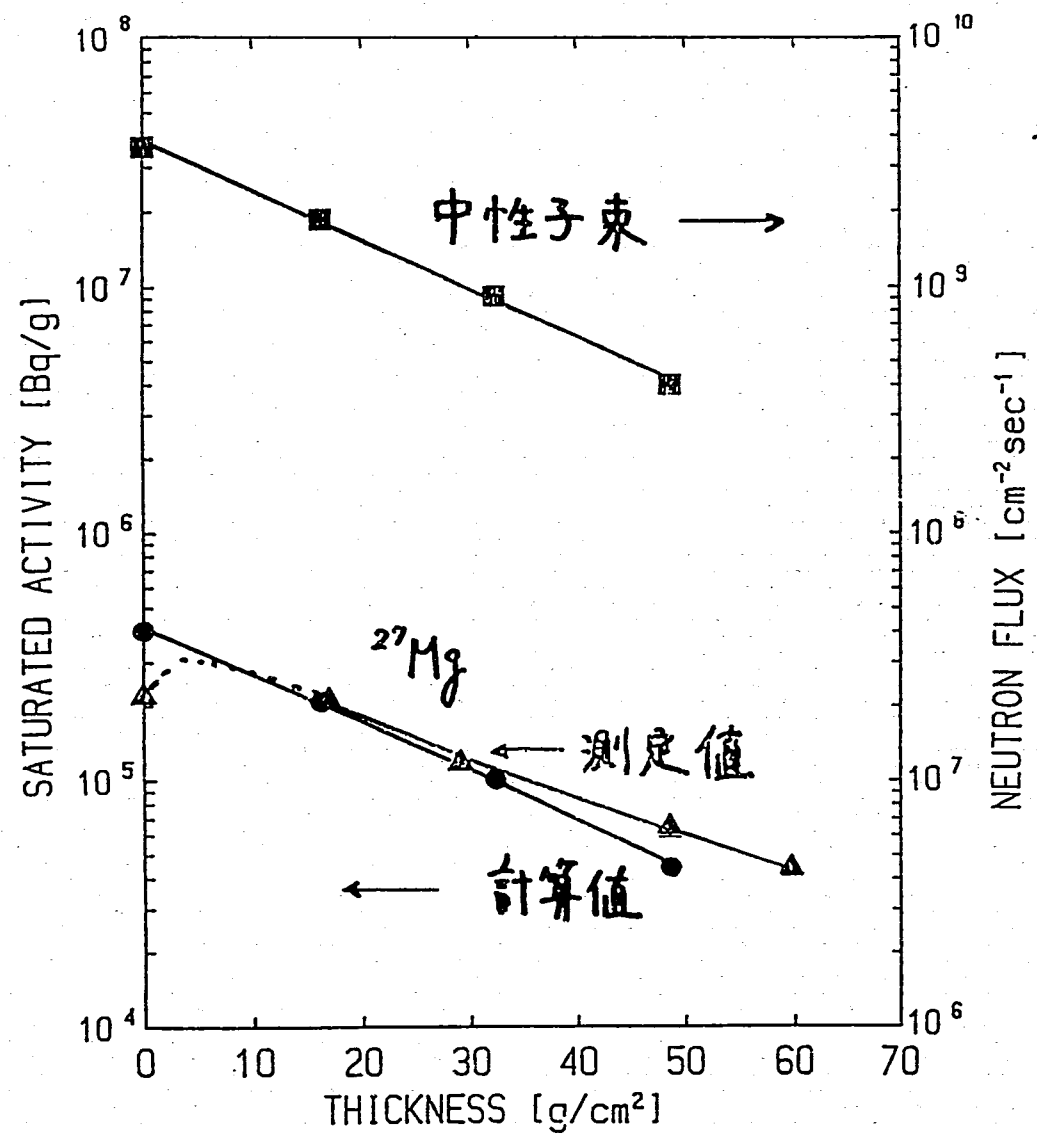
炭酸ストロンチウムに60 MeV制動放射線を照射した
際のエネルギースペクトル



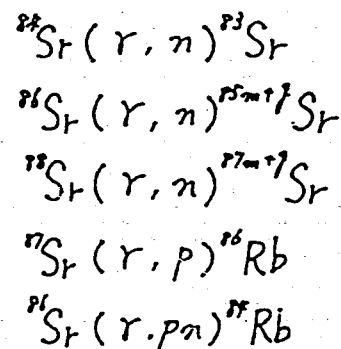
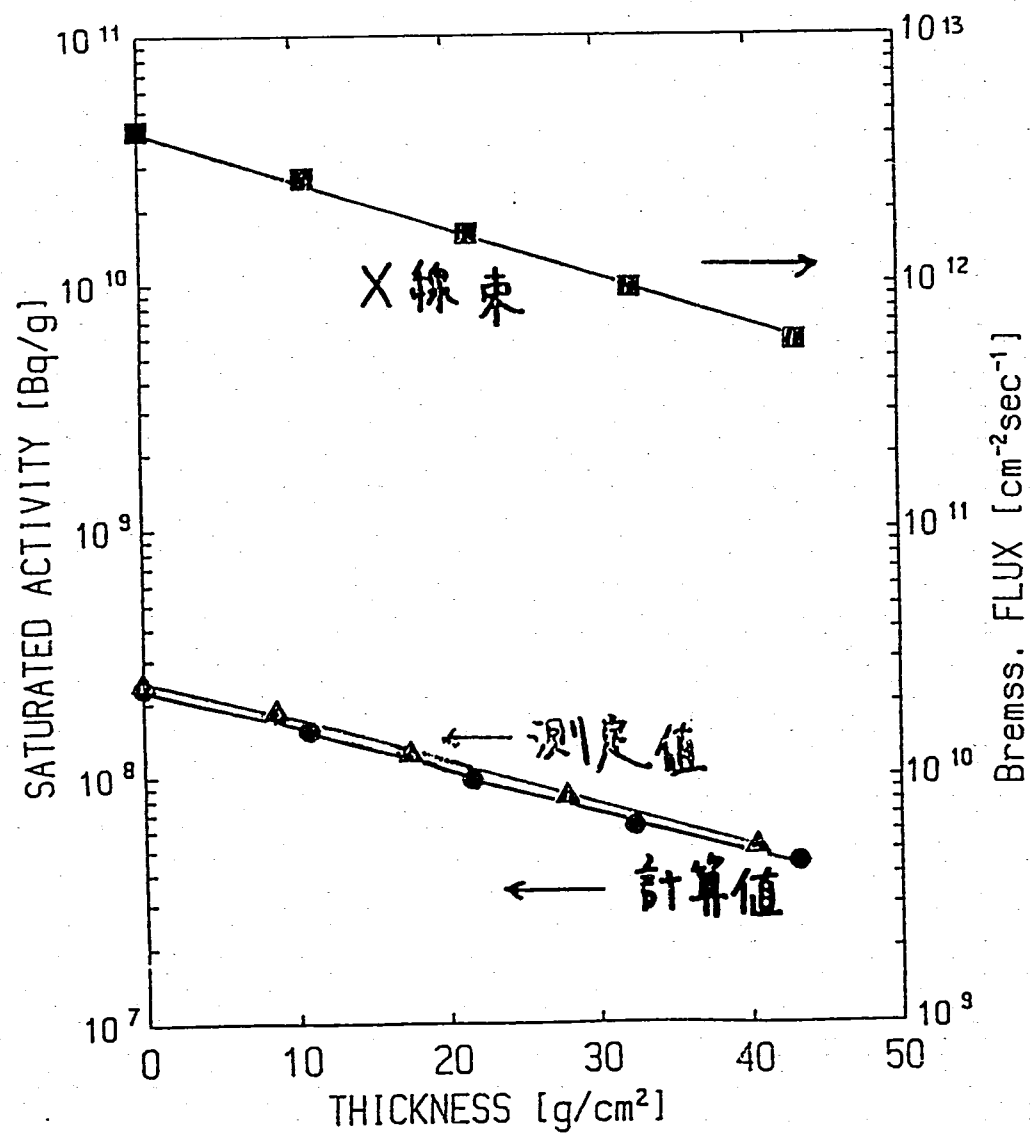
炭酸セシウム中で放出される中性子のスペクトル



炭酸セシウムに60 MeV制動放射X線を照射した際のX線束と生成した ^{132}Cs の分布



炭酸セシウムに挟んだ Al から (n, p) 反応により生成した ²⁷Mg の分布と中性子束分布



炭酸ストロンチウムに 60 MeV 制動放射 X 線を照射した際の X 線束と生成した放射性 Sr Rb の分布

< 目的 >

電子線形加速器による制動放射線を用いた
Cs及びSrの消滅処理のための基礎研究。
(γ, n)反応断面積の評価。

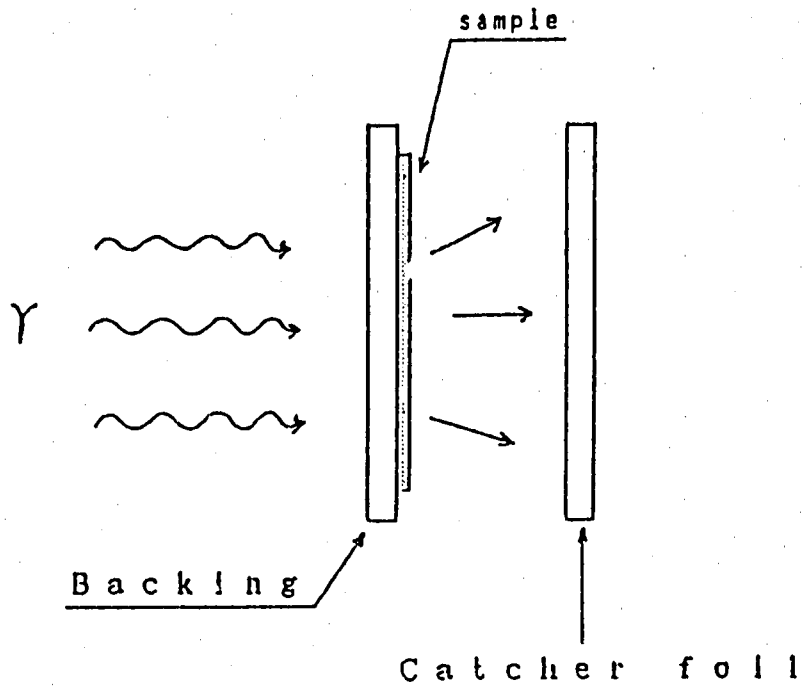
< 問題点 >

- 照射ターゲットが放射性である。
- 化学分離ができない。



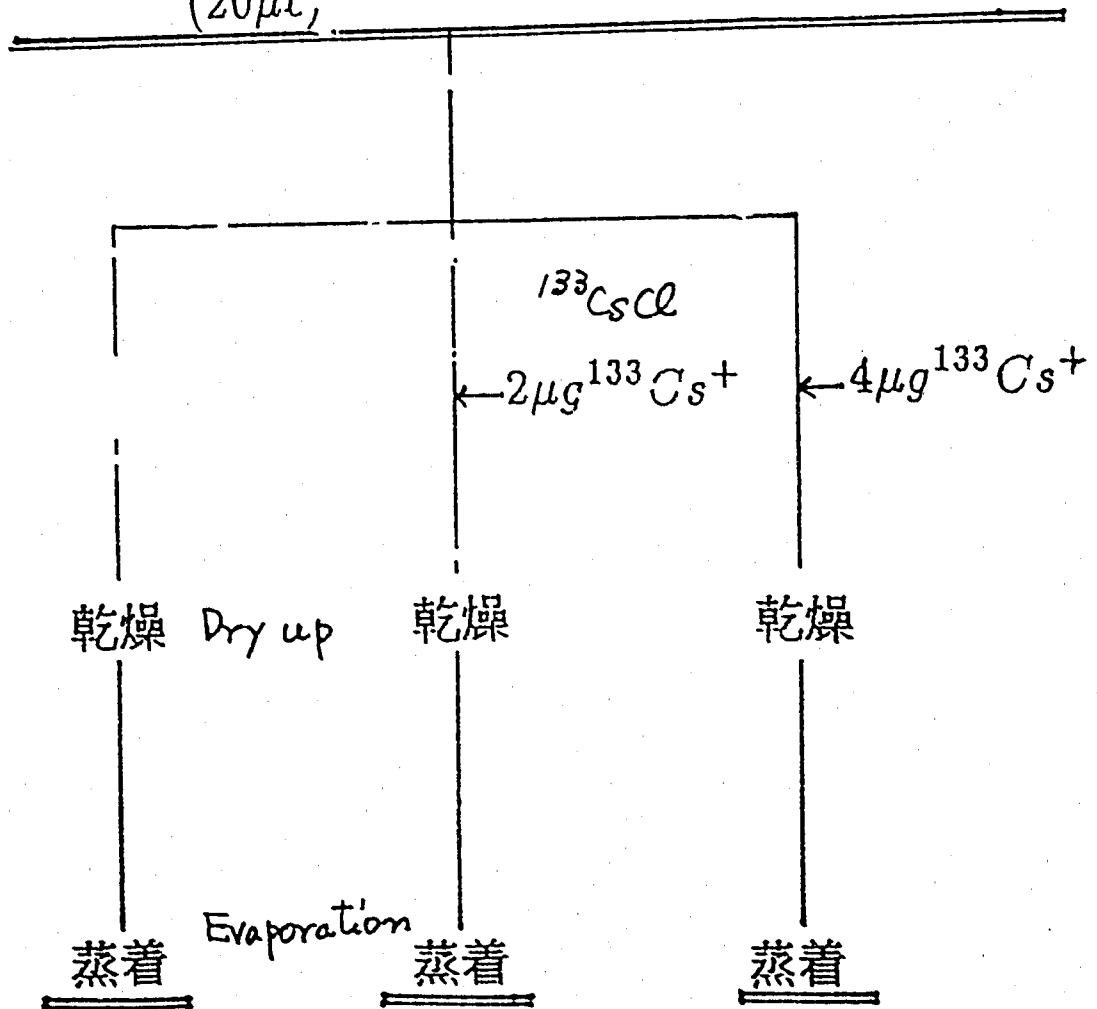
①リコイル分離法を用いる。
②同位体依存性を調べる。

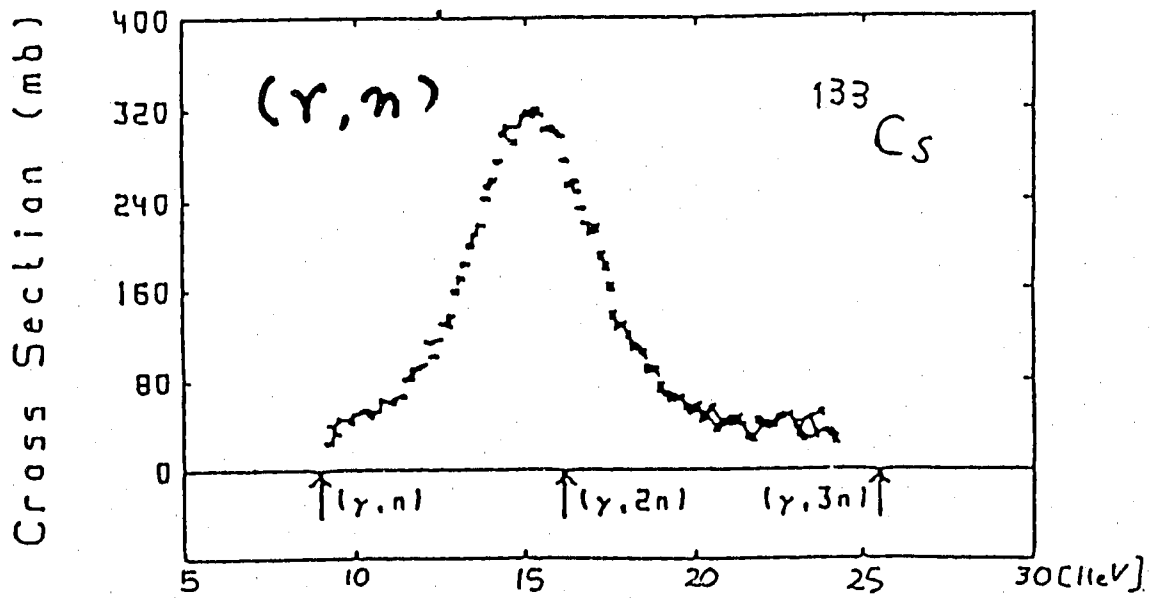
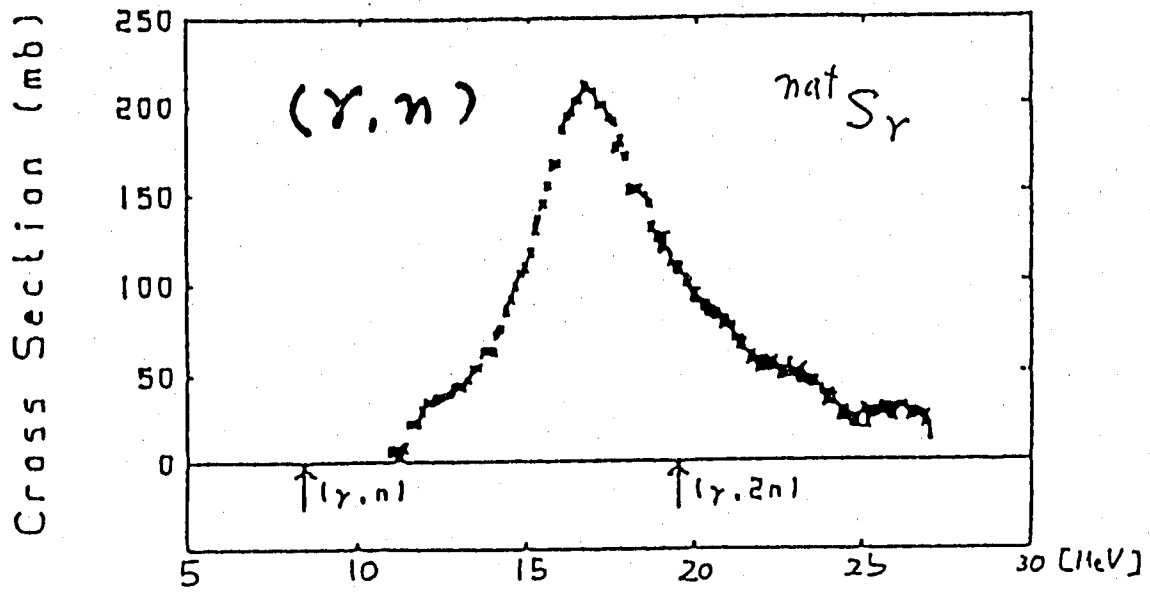
$^{137}\text{Cs}(\gamma, n)^{136}\text{Cs}$	13.16d	$\beta^{-}(100\%)$	340.57keV 818.50keV 1048.07keV
$^{133}\text{Cs}(\gamma, n)^{132}\text{Cs}$	6.475d	$\text{EC}+\beta^{-}$	667.67keV
$^{90}\text{Sr}(\gamma, n)^{89}\text{Sr}$	50.5d	$\beta^{-}(100\%)$	



$^{137}\text{CsCl}$ Solution
 ^{137}Cs 原液
 (20 μl)

{	^{137}Cs	$1.81 \times 10^2 \mu\text{Ci}$
	^{133}Cs	? μg





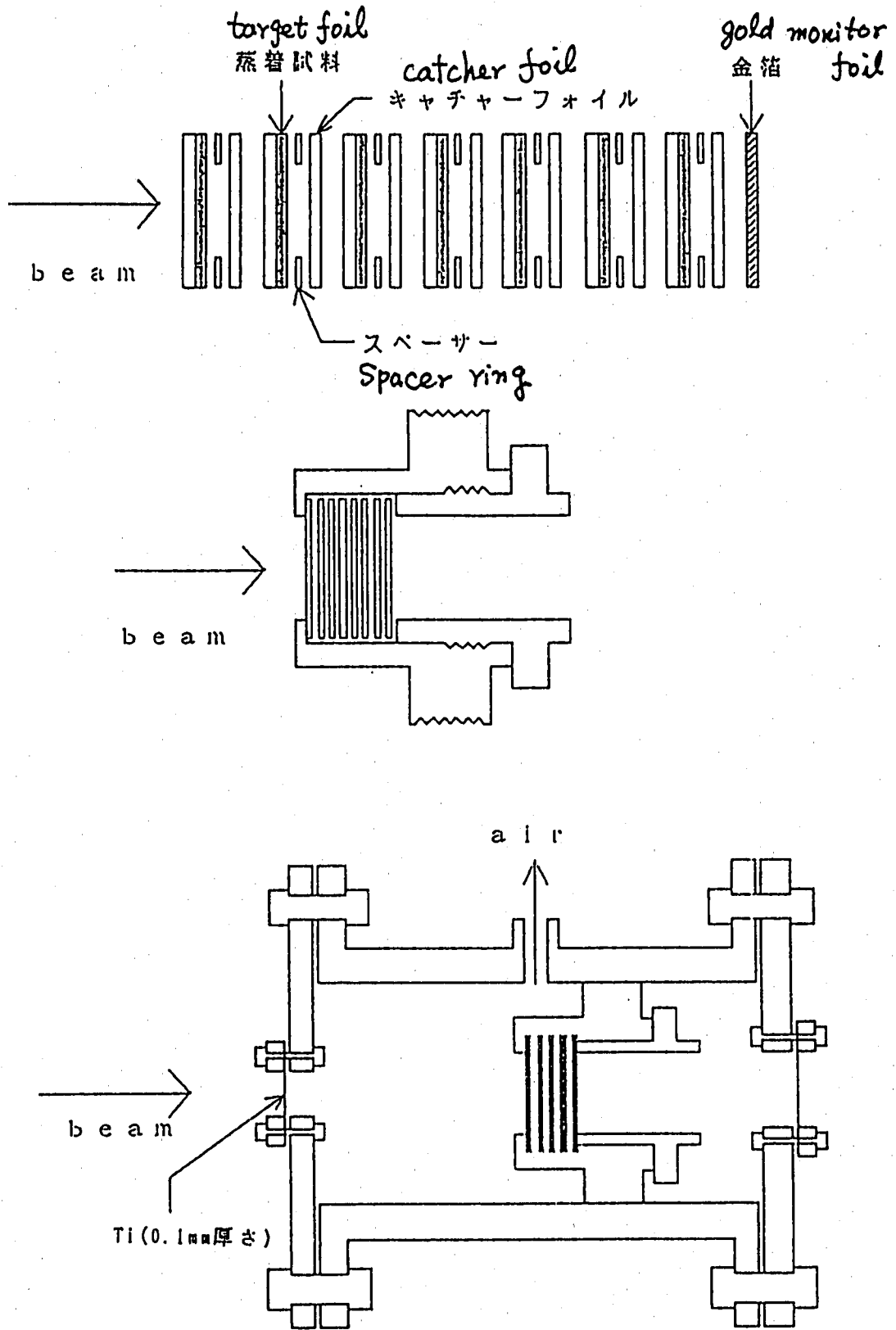
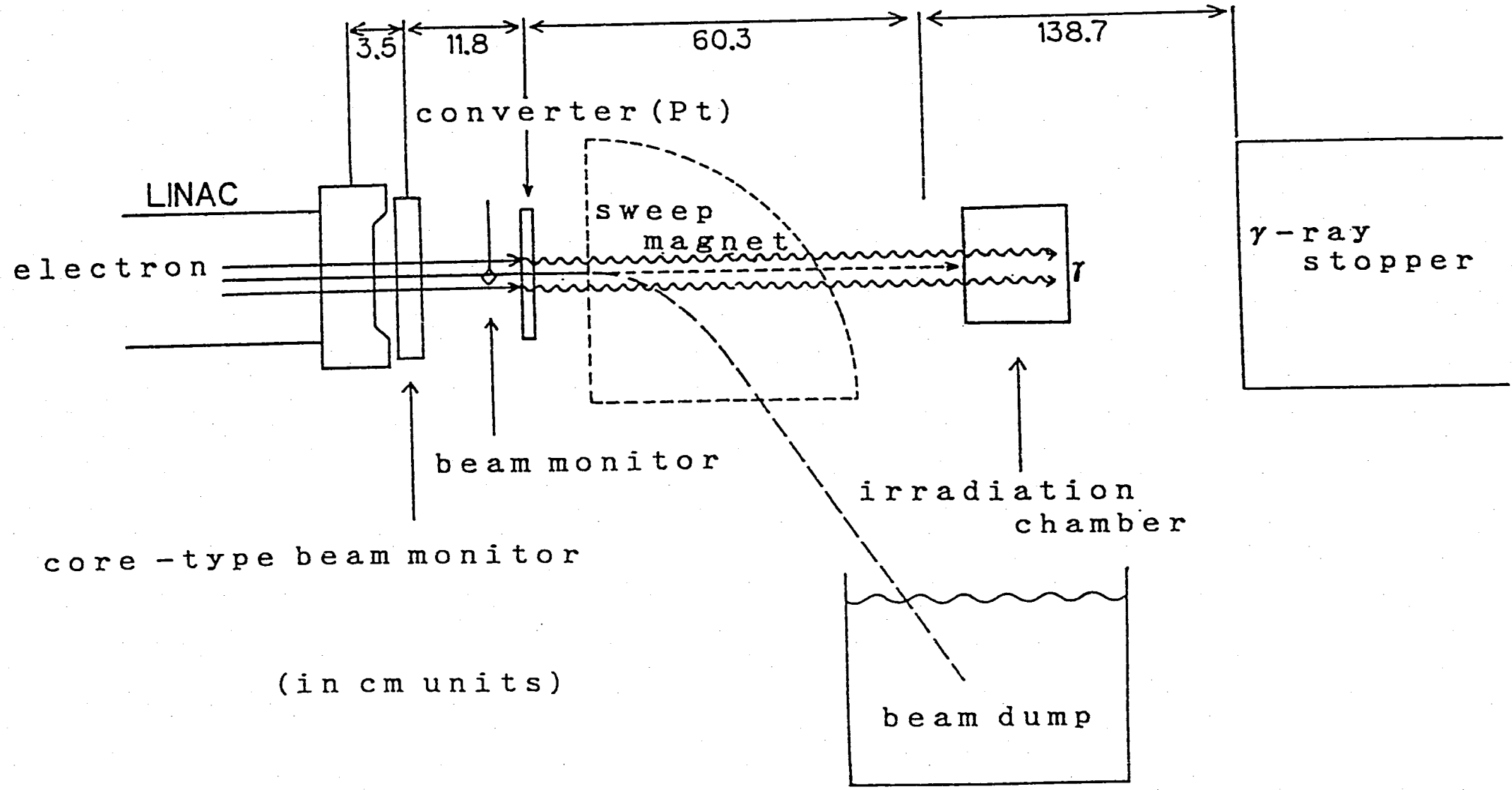


Fig. 2-3 照射ターゲット詳細図



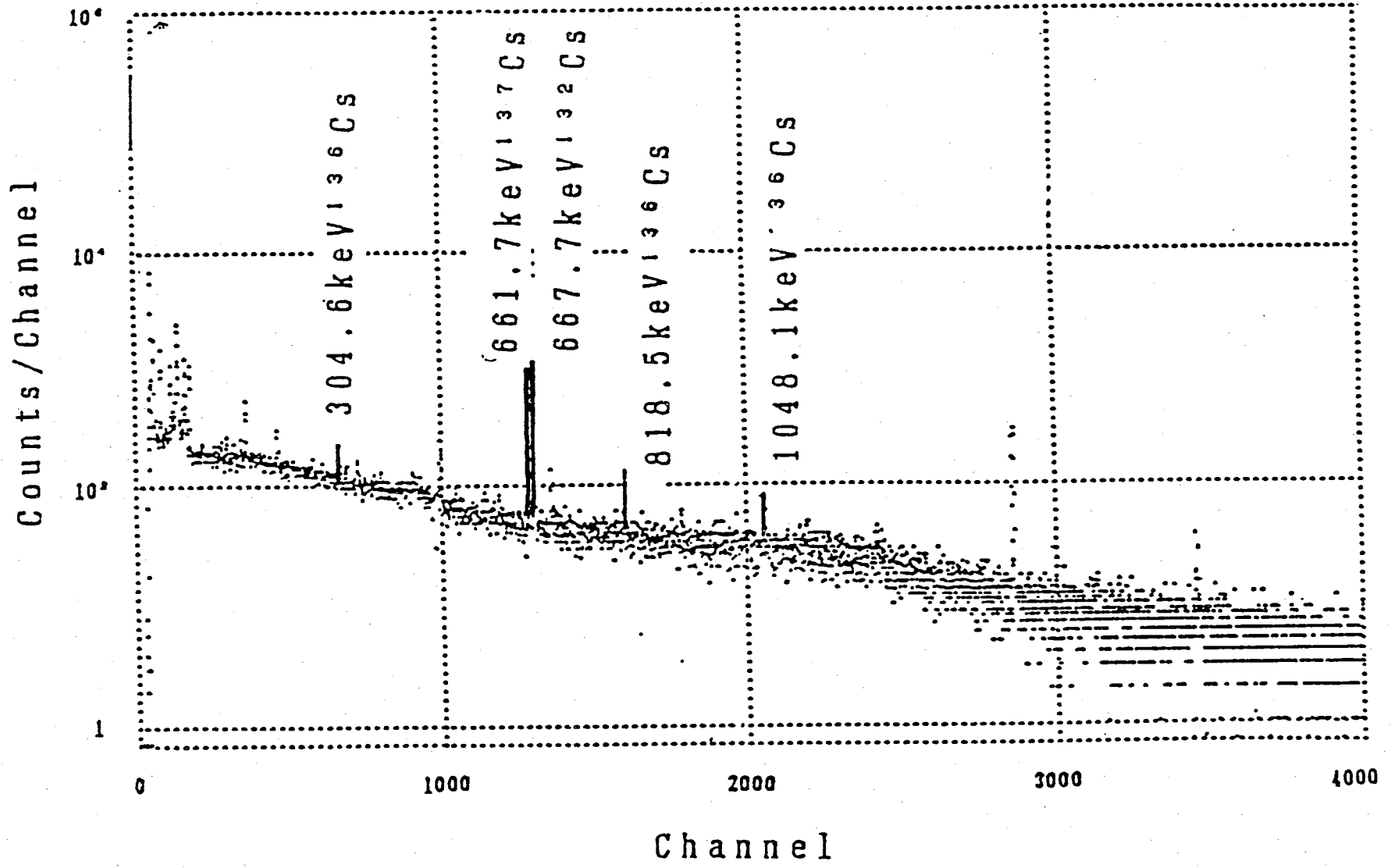


図 1 ¹³⁶Cs の γ 線 スペクトル

Table 4. Recoil separation efficiencies estimated in 45 MeV bremsstrahlung irradiation

$$\text{Separation Efficiency} = \frac{A_{\text{c136}} / A_{\text{t136}}}{A_{\text{c137}} / A_{\text{t137}}}$$

a) $\text{Recoil Fraction} = A_{\text{c136}} / A_{\text{t136}}$

No	Activity of ^{137}Cs (Bq)		Activity of ^{136}Cs (Bq)			Separation efficiency
	Catcher foil A_{c137}	Target foil A_{t137}	Catcher foil A_{c136}	A_{t136} *) Target foil	Recoil fraction	
45-1	2.00	2.87×10^6	23.2	6.33×10^2	0.037	5.2×10^4
45-2	4.74	1.96×10^6	17.1	4.32×10^2	0.040	1.6×10^4
45-3	1.06	1.47×10^6	9.14	3.24×10^2	0.028	3.9×10^4
45-4	2.26	1.25×10^6	12.6	2.76×10^2	0.046	2.5×10^4
45-5	0.655	1.48×10^6	5.07	3.26×10^2	0.016	3.5×10^4
45-6	2.32	1.89×10^6	7.03	4.17×10^2	0.017	1.4×10^4

*

$$A_{\text{t136}} = N_{137} \bar{\sigma}_{137} \Phi_{137} e_{137}$$

Φ_{137} : Estimated from Au monitor foil

$\bar{\sigma}_{137}$: Estimated from this work

^{90}Sr ターゲットについて.

1) ターゲットの製造

^{90}Sr 原液 0.00928 mg Sr/ml , 37 MBq/ml
(純度 78%?)

原液 $100 \mu\text{l} + \text{H}_2\text{O} 100 \mu\text{l} + \text{N-ブチルアルコール} 3 \text{ ml}$ を Al foil
陰極と Pt 陽極で電着 (1.5 mA で 約 20 分)

① ^{90}Sr 約 $70 \mu\text{C}$ のターゲット

② ^{90}Sr 約 $30 \mu\text{C}$ のターゲット

この電着系にさらに ^{84}Sr を $7.1 \times 10^{-7} \text{ g}$ 加えた液で電着

③ $^{84}\text{Sr} + ^{90}\text{Sr}$ ターゲット

2) 照射

^{137}Cs と同時に照射. (約 15 時間)

3) 化学処理

別紙 フローシート

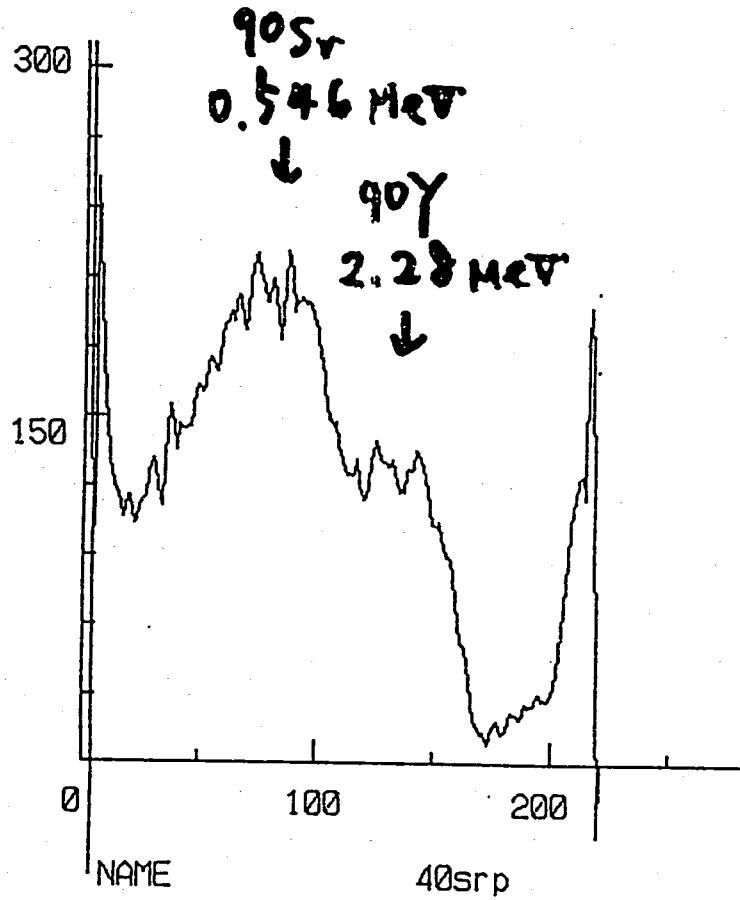
4) 測定

Ge 検出器による $\longrightarrow X$

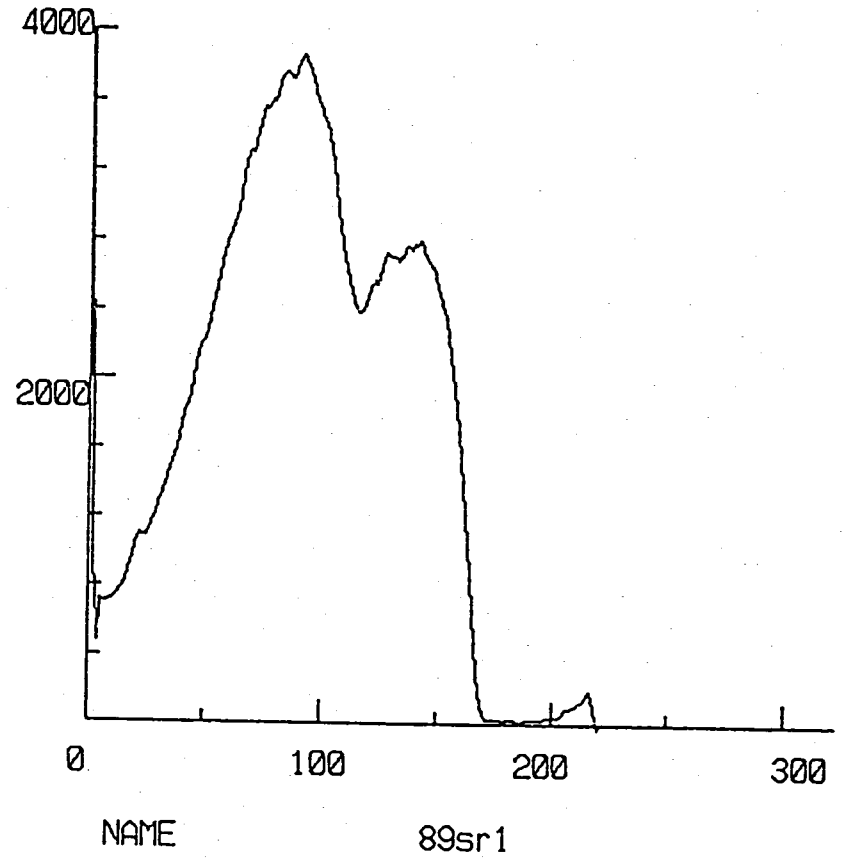
ヒコバーターによる β 線スペクトルの測定

解析はまだ進まない。

^{89}Sr 1.49 MeV



Sr 40 μCi
4000 sec



Sr standard
4000 sec

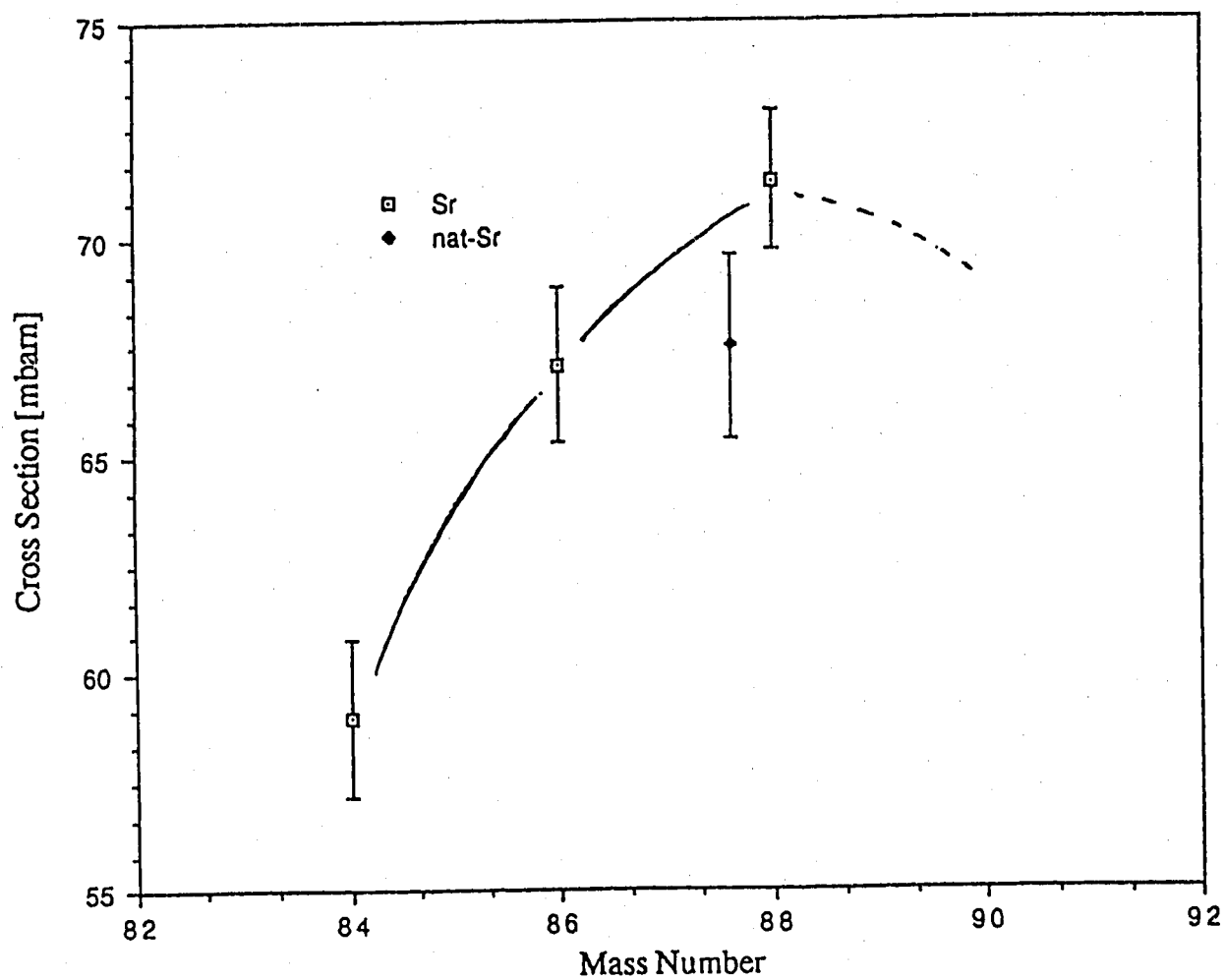


図 4.8: ^{90}Sr の光核反応断面積の推定 (60MeV)

Table 4: Average (γ, n) cross sections of nuclides around Sr

Isotope	Atomic number	Number of neutrons	Average cross section [mbarn]	Average cross section per equivalent quantum [mbarn/e.q.]	Threshold energy [MeV]
^{70}Ge	32	38	35.8 ± 1.1	45.3 ± 1.2	11.54
^{72}Ge		40	44.7 ± 1.3	56.5 ± 1.5	10.75
^{74}Ge		42	43.6 ± 1.3	55.2 ± 1.5	10.20
^{76}Ge		44	43.2 ± 1.2	54.7 ± 1.4	9.42
^{76}Se	34	42	48.7 ± 1.4	61.7 ± 1.7	11.16
^{78}Se		44	50.1 ± 1.5	63.4 ± 1.7	10.50
^{80}Se		46	49.3 ± 1.5	62.4 ± 1.7	9.92
^{82}Se		48	66.2 ± 2.0	83.7 ± 1.3	9.54
^{nat}Rb			59.6 ± 1.8	75.5 ± 2.2	9.91
^{85}Rb	37	48	$63.1 \pm 2.2^*$	$79.8 \pm 2.6^*$	10.48
^{87}Rb		50	$66.1 \pm 2.8^*$	$83.7 \pm 3.4^*$	9.93
^{nat}Sr			67.5 ± 2.1	85.4 ± 2.4	8.38
^{84}Sr	38	46	$59.0 \pm 1.8^*$	$74.7 \pm 2.2^*$	12.05
^{86}Sr		48	$67.1 \pm 1.8^*$	$84.9 \pm 2.1^*$	11.49
^{88}Sr		50	$71.3 \pm 1.6^*$	$90.1 \pm 1.9^*$	11.11
^{90}Zr	40	50	51.4 ± 1.7	65.0 ± 2.0	11.98
^{91}Zr		51	51.4 ± 1.7	65.0 ± 2.0	7.20
^{92}Zr		52	40.3 ± 1.3	51.3 ± 1.5	8.64
^{94}Zr		54	40.2 ± 1.2	50.9 ± 1.4	8.22
^{92}Mo	42	50	48.9 ± 1.6	61.9 ± 1.9	12.68
^{94}Mo		52	64.2 ± 1.9	81.3 ± 2.2	9.68
^{96}Mo		54	66.0 ± 1.9	83.5 ± 2.2	9.15
^{98}Mo		56	63.1 ± 1.8	79.9 ± 2.1	8.64
^{100}Mo		58	58.7 ± 1.7	74.3 ± 1.9	8.29
^{98}Ru	44	54	$77.1 \pm 2.4^*$	$97.6 \pm 2.8^*$	10.23
^{104}Ru		60	$74.6 \pm 2.4^*$	$94.4 \pm 2.8^*$	8.91

* : Our experimental data

Other data were obtained from Ref.(5).

Table 5: Average (γ, n) cross sections of nuclides around Cs

Isotope	Atomic number	Number of neutrons	Average cross section [mbarn]	Average cross section per equivalent quantum [mbarn/e.q.]	Threshold energy [MeV]
^{116}Sn	50	66	81.5 ± 6.5	103.2 ± 3.0	9.56
^{117}Sn		67	89.3 ± 2.6	113.1 ± 3.1	6.94
^{118}Sn		68	83.8 ± 2.5	106.1 ± 2.9	9.33
^{119}Sn		69	79.7 ± 2.4	100.9 ± 2.7	6.48
^{120}Sn		70	89.9 ± 2.6	113.8 ± 3.1	9.11
^{124}Sn		74	83.1 ± 2.5	105.3 ± 2.9	8.49
^{124}Te	52	72	104.1 ± 3.0	131.8 ± 3.5	9.42
^{126}Te		74	104.7 ± 3.1	132.5 ± 3.5	9.12
^{128}Te		76	102.0 ± 2.9	129.1 ± 3.4	8.78
^{130}Te		78	103.0 ± 3.0	130.4 ± 3.5	8.41
^{133}Cs	55	78	101.9 ± 3.0	129.0 ± 3.4	8.99
^{137}Cs		82	$124.3 \pm 11.8^*$	$157.4 \pm 14.8^*$	8.27
^{142}Nd	60	82	128.5 ± 3.8	162.7 ± 4.4	9.82
^{143}Nd		83	120.4 ± 3.5	152.4 ± 3.5	6.12
^{144}Nd		84	99.8 ± 2.8	126.3 ± 3.2	7.82
^{145}Nd		85	100.1 ± 2.8	126.7 ± 3.2	5.76
^{146}Nd		86	95.0 ± 2.7	120.2 ± 3.0	7.56
^{148}Nd		88	70.4 ± 2.1	89.1 ± 2.4	7.33
^{150}Nd		90	93.6 ± 2.6	118.5 ± 2.9	7.38
^{144}Sm		62	82	128.6 ± 3.8	162.7 ± 4.4
^{148}Sm	86		103.6 ± 3.2	131.2 ± 3.7	8.16
^{150}Sm	88		100.0 ± 2.9	126.7 ± 3.4	7.99
^{152}Sm	90		106.9 ± 3.1	135.3 ± 3.6	8.26
^{154}Sm	92		99.9 ± 2.9	126.4 ± 3.4	7.97

* : Our experimental data
Other data were obtained from Ref.(5).

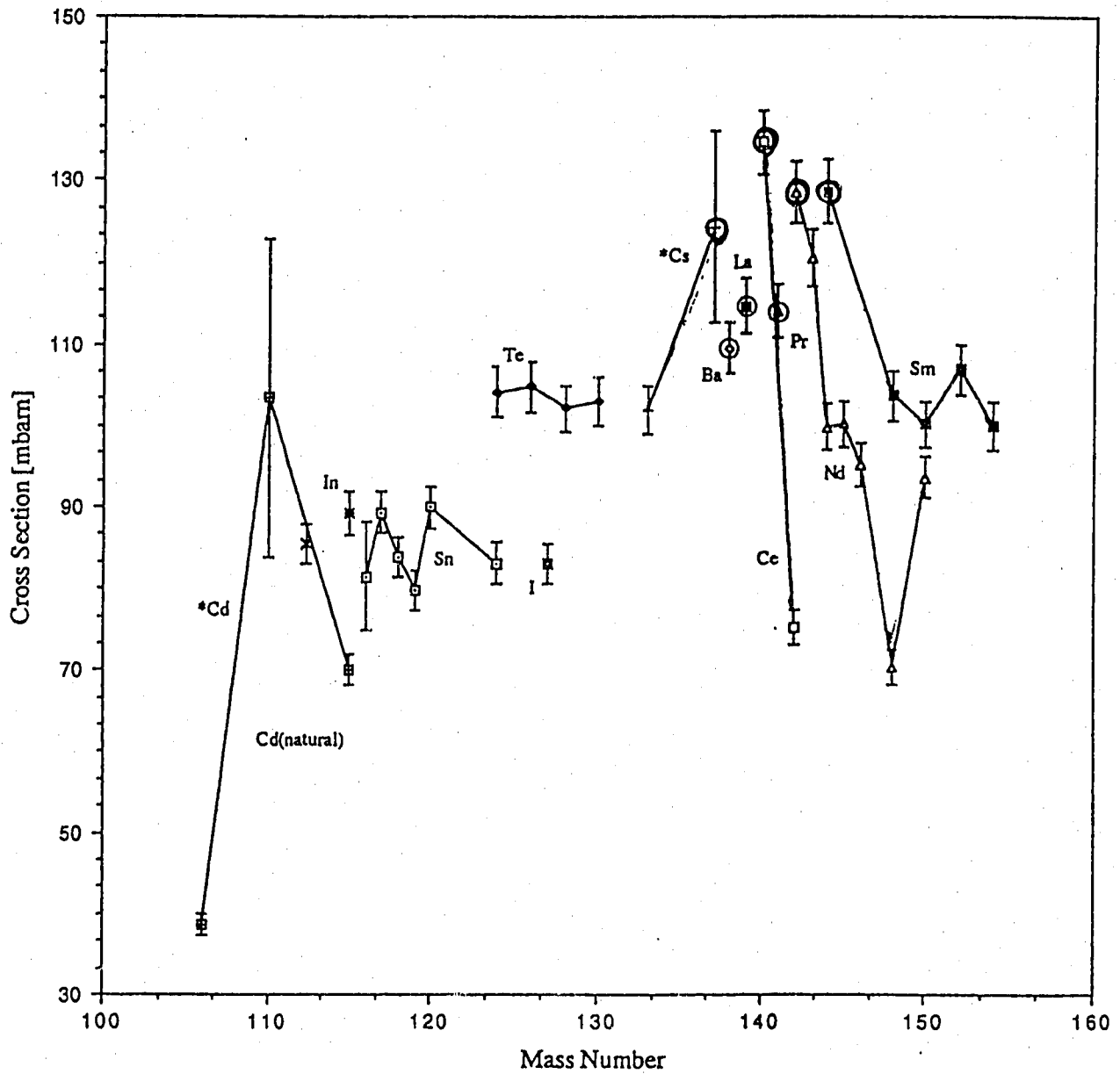


図 4.7: Cs 付近の核の反応断面積の同位体依存性 (60MeV)
 (*は実験値、その他は計算値、○印は中性子数がマジックナンバーの核)

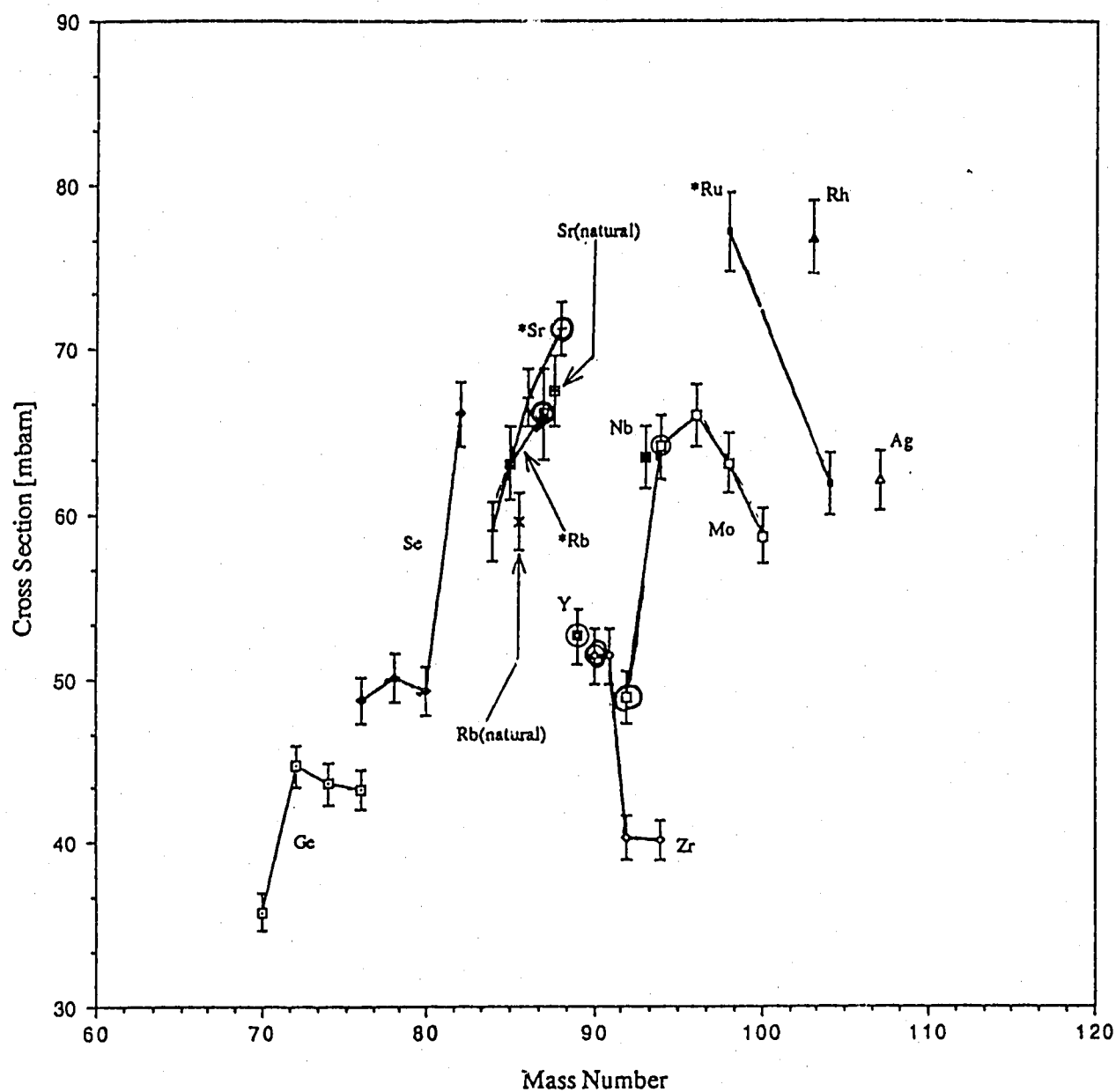
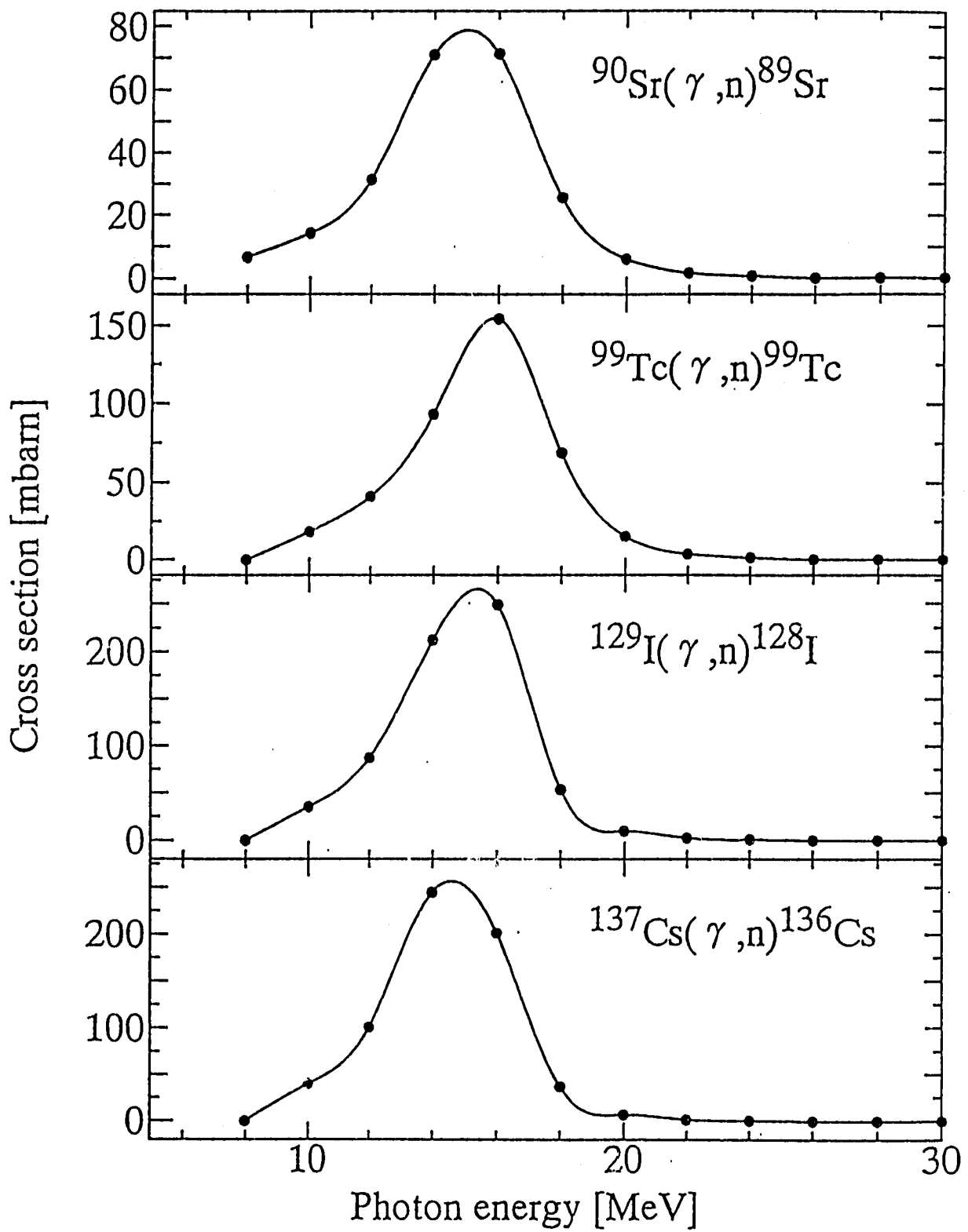


図 4.6: Sr 付近の核の反応断面積の同位体依存性 (60MeV)
 (*は実験値、その他は計算値、○印は中性子数がマジックナンバーの核)



one is the average cross section per equivalent quanta,

$$\bar{\sigma}_{133}^{\text{eq}} = \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} \sigma(E) \cdot \phi(E) dE}{\frac{1}{E_{\text{max}}} \int_0^{E_{\text{max}}} E \phi(E) dE} \quad [\text{mb/eq.q.}],$$

and the other is the average cross section,

$$\bar{\sigma}_{133} = \frac{\int_{E_1}^{E_2} \sigma(E) \cdot \phi(E) dE}{\int_{E_1}^{E_2} \phi(E) dE} \quad [\text{mb}],$$

where E_{max} : maximum energy of bremsstrahlung,

E_1 and E_2 : lower and upper energy limits of giant dipole resonance region,

which are fixed to be 9 and 25 MeV, respectively.

Table 3. Average cross section ratio, $\bar{\sigma}_{137}/\bar{\sigma}_{133}$ and average cross sections and those per equivalent quanta of $^{133}\text{Cs}(\gamma,n)$ and $^{137}\text{Cs}(\gamma,n)$ reactions

Irradiation $E_{\gamma \text{ max}}$	Cross section ratio ($\bar{\sigma}_{137}/\bar{\sigma}_{133}$)	Average cross section (mb/eq.q.)		Average cross section (mb)	
		^{133}Cs	^{137}Cs	^{133}Cs	^{137}Cs
45 MeV	1.10±0.05	123±5	135±8	104±5	114±7
60 MeV	1.22±0.11	129±3	157±15	102±3	124±12

(γ, X) 反応の研究

(1) TRU の (γ, f) 反応 断面積, mass yield, 核変換量

特に Pu が "ほとんど" だよ ^{243}Am , ^{244}Cm , ^{248}Cm "ほとんど" の Pu

(2) 反跳法による (γ, X) 反応断面積

 ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{129}I , ^{99}Tc "ほとんど" の長寿命で放射性核種の Pu

(3) 体系内における γ, n, 発熱, 放射化量

 $e \rightarrow \gamma \rightarrow n, p, \alpha \rightarrow$ 二次反応

- 特に γ の核と γ が $t > 1/2$ で存在 isotope である γ が $t > 1/2$ 別の isotope に変化する二次反応
- 二次的に発熱 (n, p, α "ほとんど" による二次反応)
- ターゲットの発熱: 放射化量の評価

(4) これらの実験も単色 γ 線ビームでできる

"ほとんど" できなく, 29 年以内の単色 γ 線の発生

- γ 線レーザー
- 逆コンプトン効果
- 大電流ビームによる positron 消滅 in flight

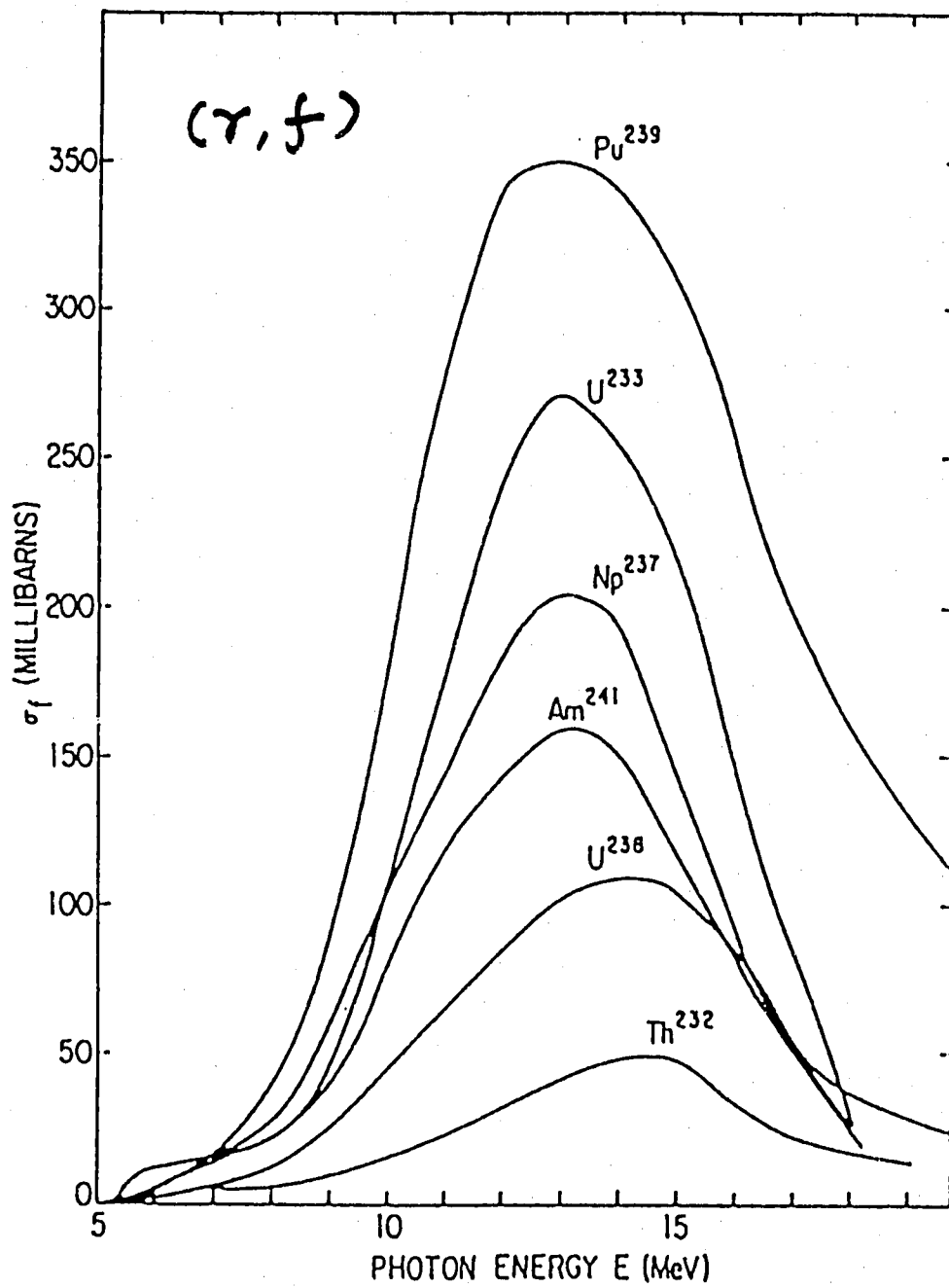


FIG. 2.83. Photofission cross sections versus photon energy for the 6 nuclei shown in Fig. 2.82. From KATZ, BAERG, AND BROWN.²⁰⁸

付録 2

講演OHP集 3

ターゲットの構造と利用

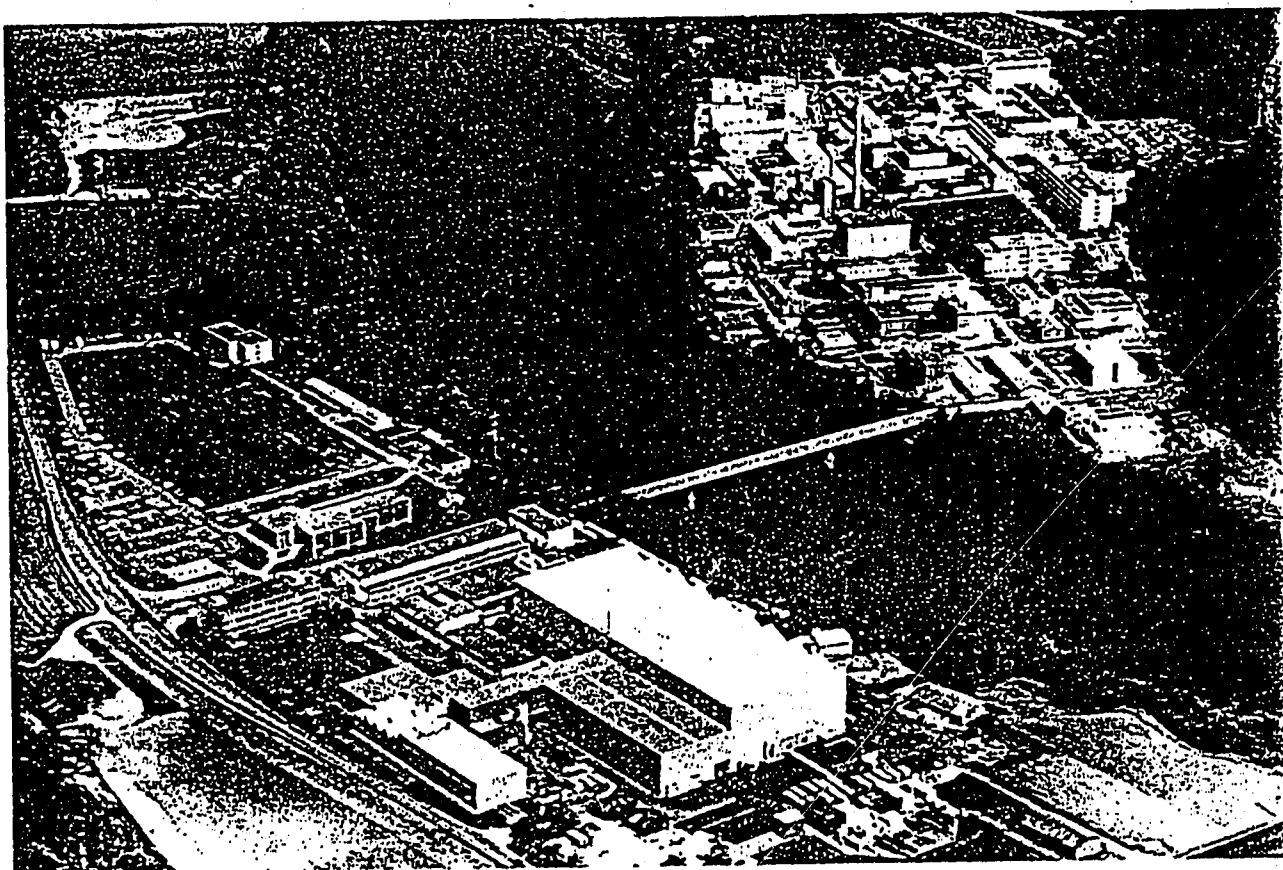
スイス Paul Sherrer Institut

武田 靖



Paul Scherrer Institut

EIR



SIN

Jahresbericht 1989

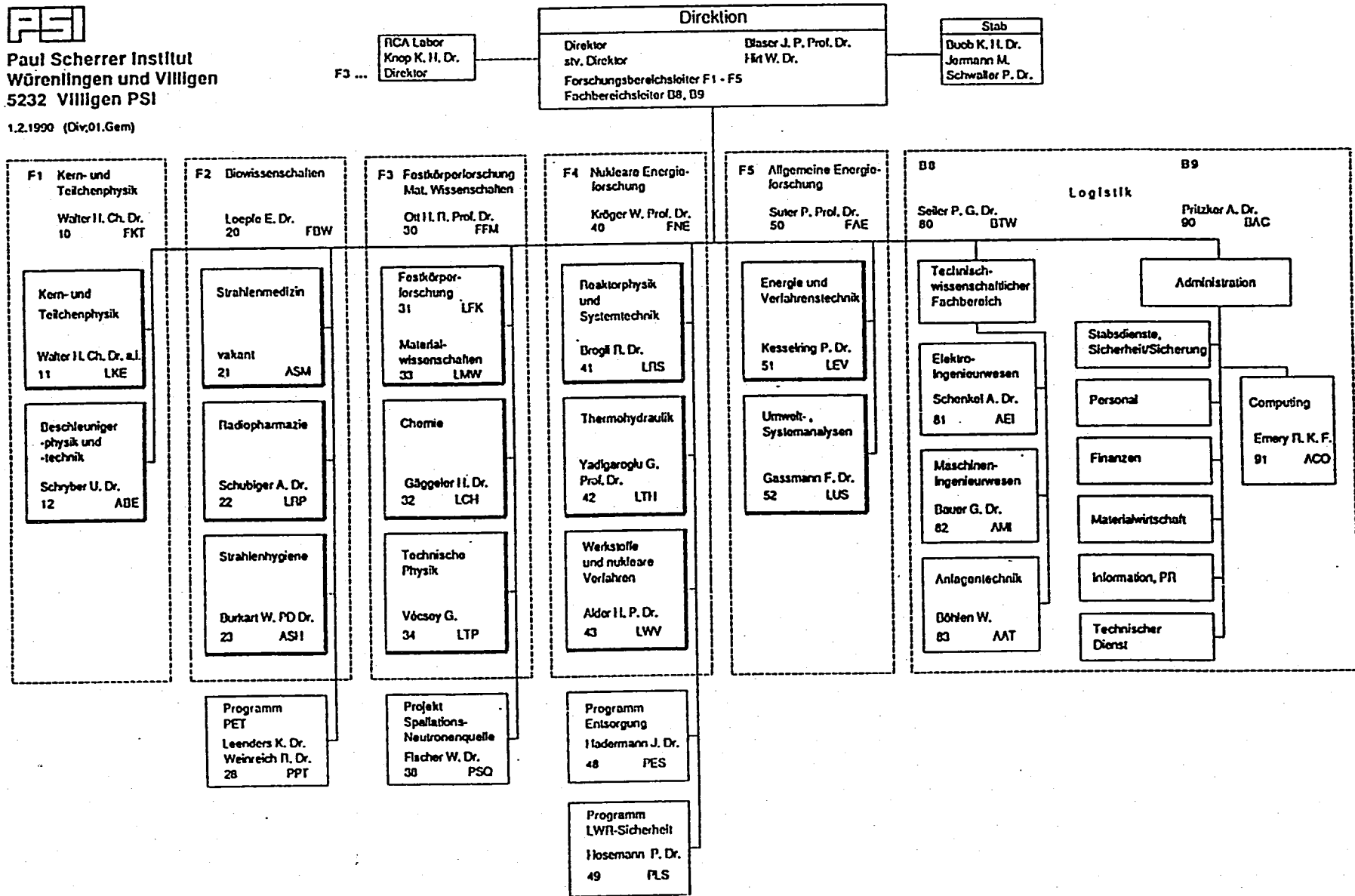
Paul Scherrer Institut
Würenlingen und Villigen
CH-5232 Villigen PSI

Telefon 056/99 21 11
Telex 82 74 14 psi ch
Telefax 056/98 23 27



Paul Scherrer Institut
Würenlingen und Villigen
5232 Villigen PSI

1.2.1990 (Div.01.Gem)



Volumetric Power Density (Heat Generation)

PWR	100 MW/m ³
BWR	45 MW/m ³
FBR	300 MW/m ³

SINQ Target

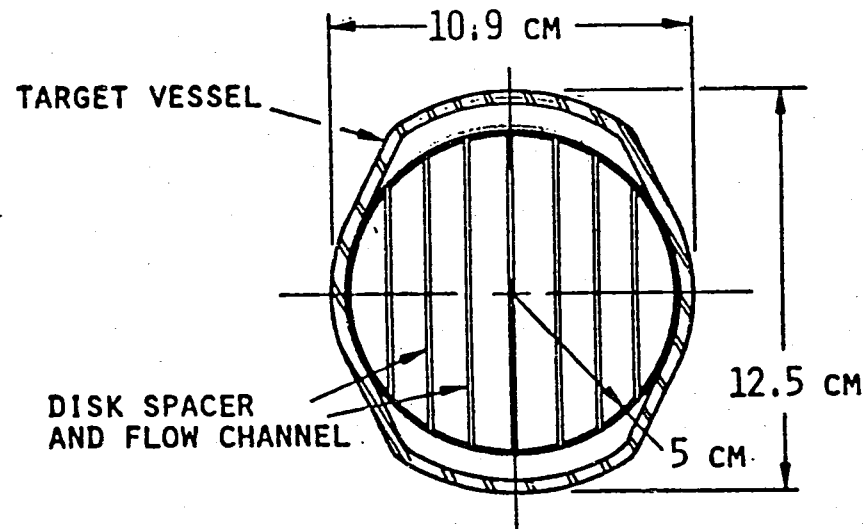
Beam Diameter	10 cm
Proton Range (590MeV)	30 cm
Beam Power	750 kW

⇒ Power Density 320 MW/m³

$$\text{PNC } 10 \text{ MeV} \cdot 20 \text{ mA} = 200 \text{ kW}$$

$$\sim 240 \text{ kW/l}$$

IPNS
(ANL)



NOTE:

RADIATION EFFECTS TARGET
SHOWN, NEUTRON SCATTERING
TARGET IS IDENTICAL EXCEPT
FOR TARGET ORIENTATION
(ROTATED 90° ALONG TARGET AXIS)

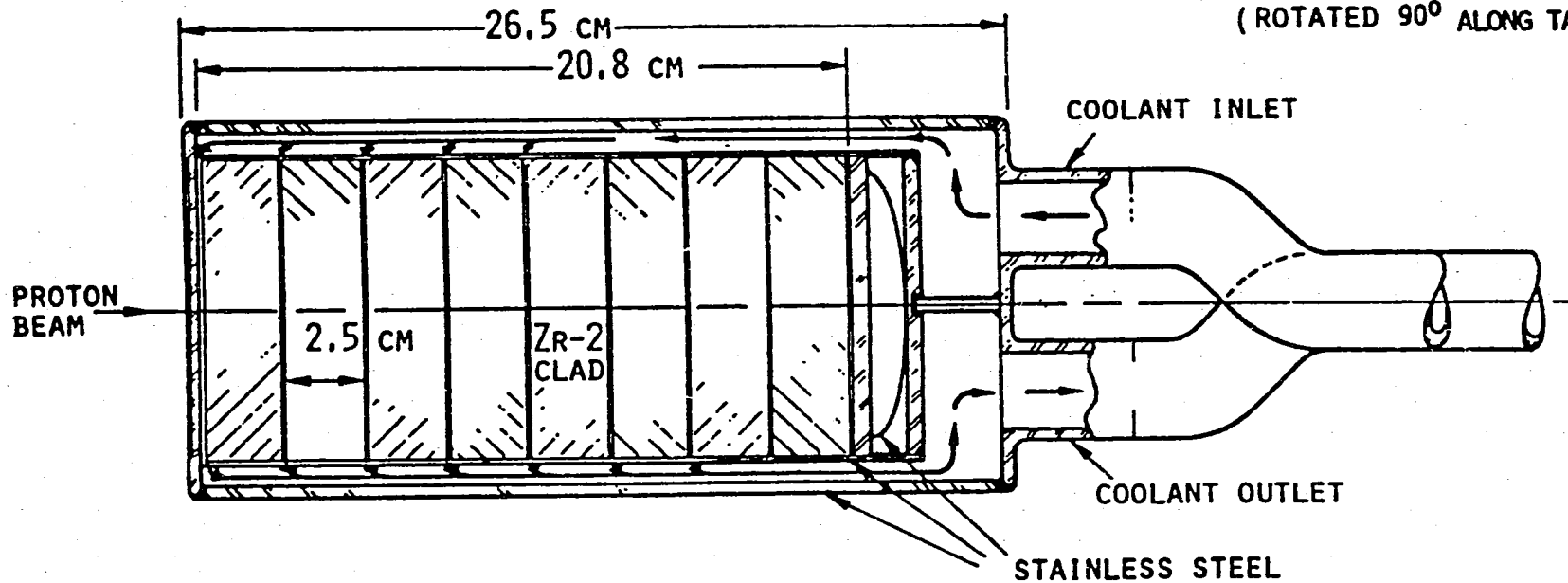


Fig. 11. IPNS-I Reference Target Design

SPN-160

TNF
(TRIUMF)

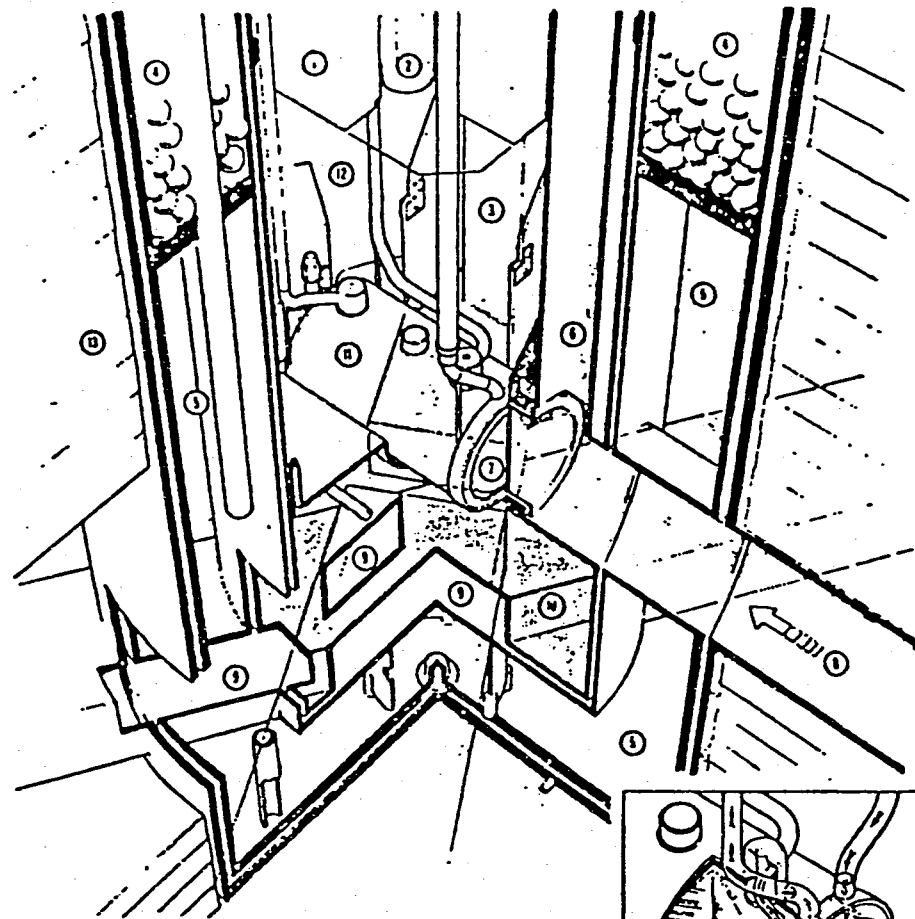


Fig. 2. Inside view of the thermal neutron target, moderator and reflector. 1) Shadow shield, 2) plug, 3) D_2O moderator access, 4) iron-concrete shield, 5) reflector H_2O , 6) proton beam access, 7) water window, 8) protons, 9) neutron channels, 10) moderator D_2O , 11) target, 12) moderator H_2O , 13) steel shield, 14) water window and target front cooling.

Vertical holes in the poured-in-place shielding are provided for storage of radioactive components. Concrete blocks can be removed as necessary to gain access to the neutron channels. The hot cell and shielding over the cave can be removed if major components, such as neutron target, moderator and reflector tanks or the isotope production thimble, have to be removed.

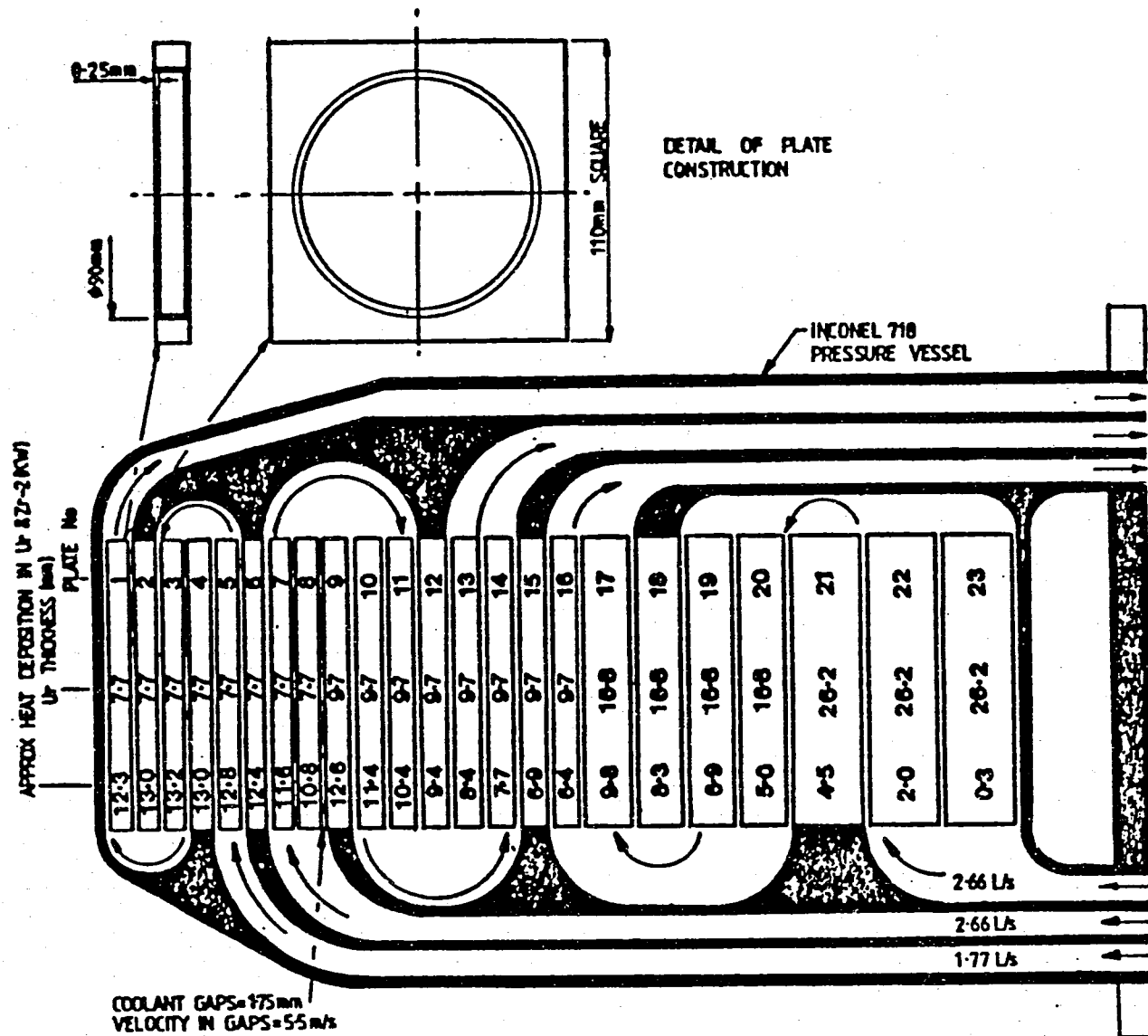
Target Geometry

Figure 2 is a cut-away view of the lower section of the neutron target tank. The target consists of a stainless steel can, 150 mm diam x 250 mm long, filled with lead, in which the beam is stopped. Lead was chosen after consideration of natural uranium, tungsten, lead-bismuth and copper. Natural uranium² is unattractive because of its six times higher heat production. Lead-bismuth would result in lower target temperatures but is undesirable because of the $210Po$ hazard. Tungsten would be more difficult to cool and the resulting construction of the water-cooled thin plates would produce a 2.5 times lower neutron flux and expose too much water to the proton beam. Copper would perhaps be easier to cool but its lower neutron yield makes it unattractive.¹

The target is submerged in the H_2O moderator, which also acts as the coolant. Below the centre of the target is a compartment filled with D_2O . The moderator tank is surrounded by the reflector tank, also filled with H_2O . The upper part of the reflector tank is filled with a steel/concrete mixture as shielding. Directly above the target, shielding is provided by a steel shadow shield and the moderator water. Both the moderator and reflector tanks are located inside the vacuum tank and are serviceable through the top flanges in the TNF cave. The vacuum in the tank is kept at 0.01 Torr. A 3 mm thick aluminum beam window separates the moderator water from the vacuum.

CONI-170

SNS
(RAL)



T_{cl} (max) = 380°C
W_{max} = 300 W/cm²
T (Zr) ~ 120°C

BULK OUTLET TEMPERATURE 50°C
OUTLET PRESSURE 3.4 BARS

HEAT DEPOSITED IN TARGET	KW
a) In ²³⁵ U including decay	209
b) In Zircaloy-2 cladding	6
c) In Inconel Vessel including Window	7
d) In Heavy Water Coolant	5
TOTAL	<u>227</u>

INLET PRESSURE 4.76 BARS
HEAVY WATER COOLANT
AT 63°C

FIG:1 TARGET COOLING PARAMETERS AND TEMPERATURE DISTRIBUTION (FULL INTENSITY PROTON BEAM)

SNQ
(KFA)

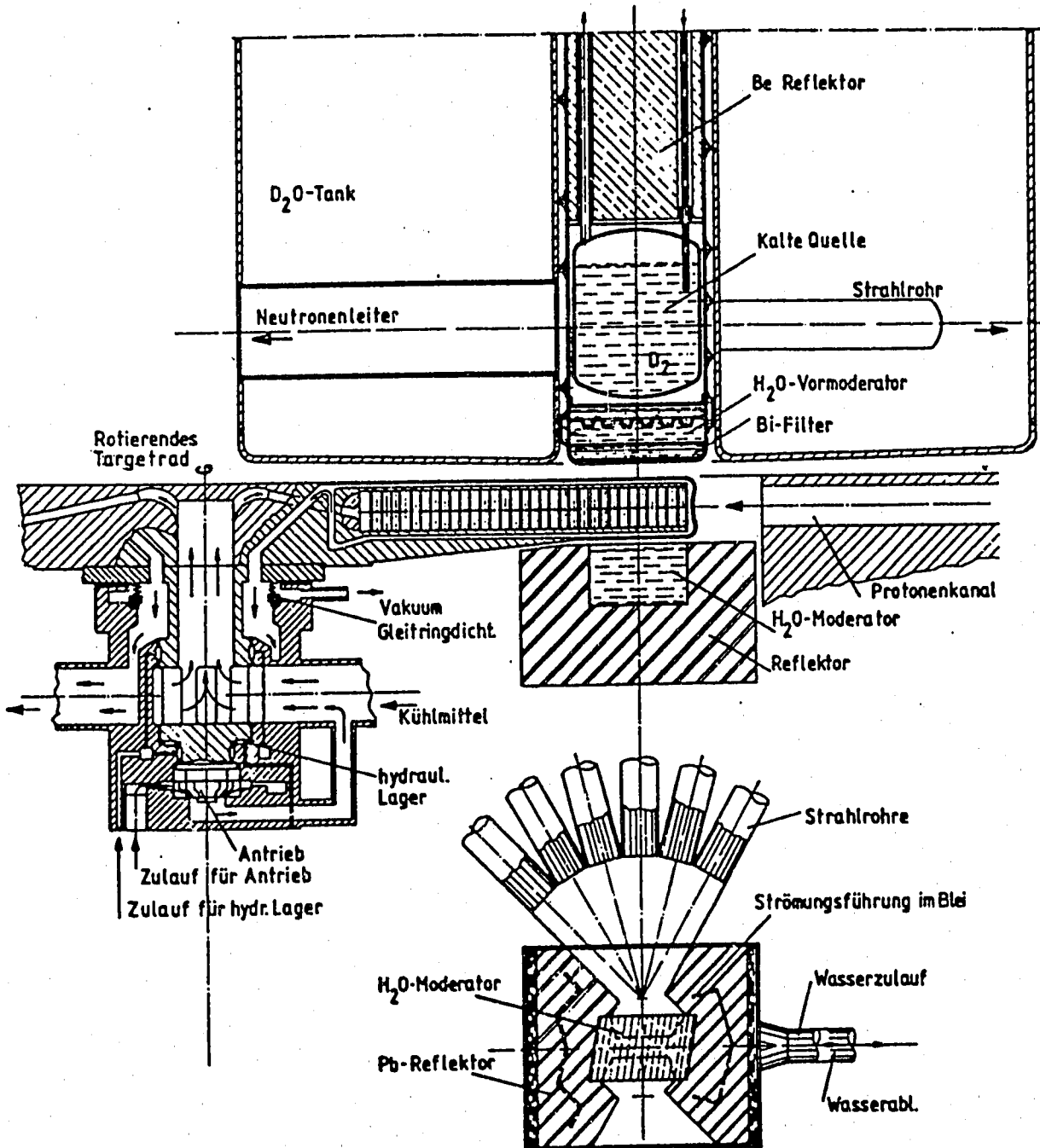


Abb. 2-30
Anordnung der Moderatoren oberhalb und unterhalb des Drehtargets und Horizontalschnitt durch den unteren Moderator mit Reflektor.

$$Q = \frac{\text{Power}}{A \cdot L}$$

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{Q}{h \cdot A}$$

Knowledge required for development of the Spallation Neutron Sources

- * Spallation Physics mechanism of neutron production
 - Neutron yield
 - Neutron spectrum
 - Energy desposition
 - Yield of spallation products

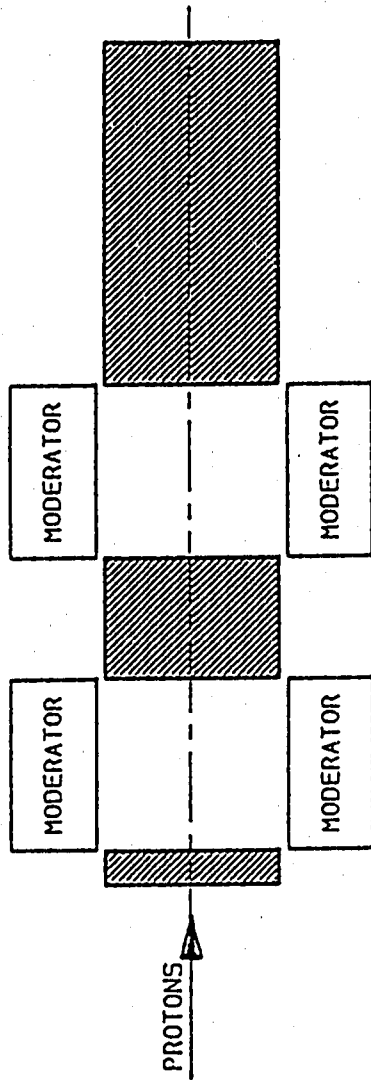
- * Neutron Physics Moderation, Thermalization and Transportation of neutron
 - Target optimization
 - Moderator-reflector optimization
 - Beam tube optimization
 - Shielding

- * Thermal Engineerign General problems of Heat Transportation with Internal heat Generation
 - Heat removal from target --- target design
 - Moderator design
 - Thermohydrodynamics of liquid target

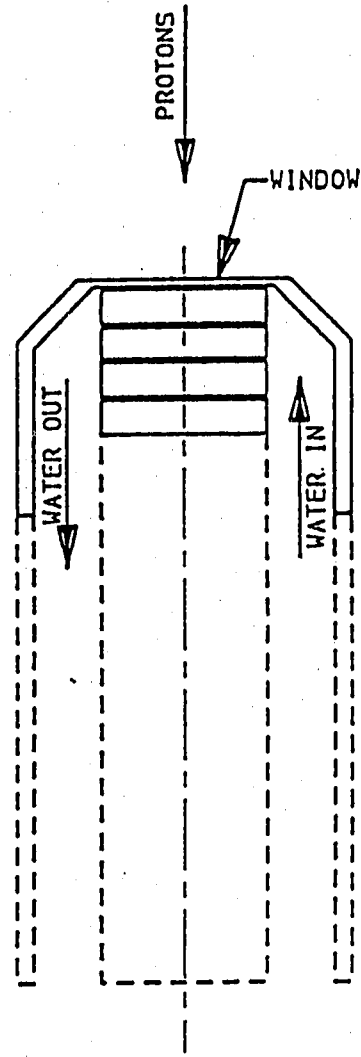
- * Material Engineering Radiation damage by neutron and proton
 - Material selection
 - Stress analysis --- target design
 - Fatigue analysis --- operational condition

Report of the Target Working Group 1: Heterogeneously Cooled Non-Fissionable Solid Targets (Stationary or Moving)

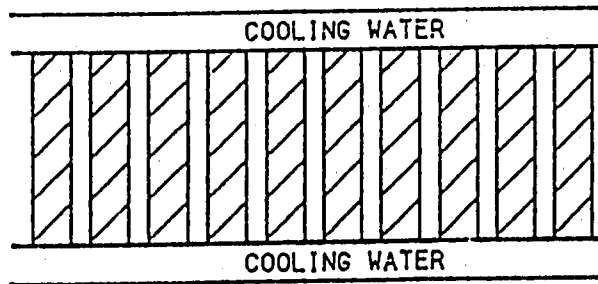
1	Introduction	29
2	Options Considered	29
	2.1 Stationary Target with Water Cooled Plates	29
	2.2 Edge cooled targets	30
	2.3 Annular flux trap target	30
	2.4 Multiple flux trap target	30
	2.5 Block Target	31
	2.6 Rotating Target	31
3	Discussion of the Stationary Water Cooled Plate Target	32
	3.1 Head Load/Heat Removal	32
	3.2 Engineering considerations	32
	3.3 Materials	32
	3.4 Proton Beam Window	33
	3.5 General Comments	33
4	Research and Development	34
	4.1 Simulation Calculations	34
	4.2 Mechanical engineering	34
	4.3 Proton Beam Window	35
	4.4 Material Damage	35
	4.5 General	35
5	Resources	36
6	Conclusions	36



FLUX TRAP



SOLID PLATE



EDGE COOLED

Fig. 1a TARGET CONCEPTS

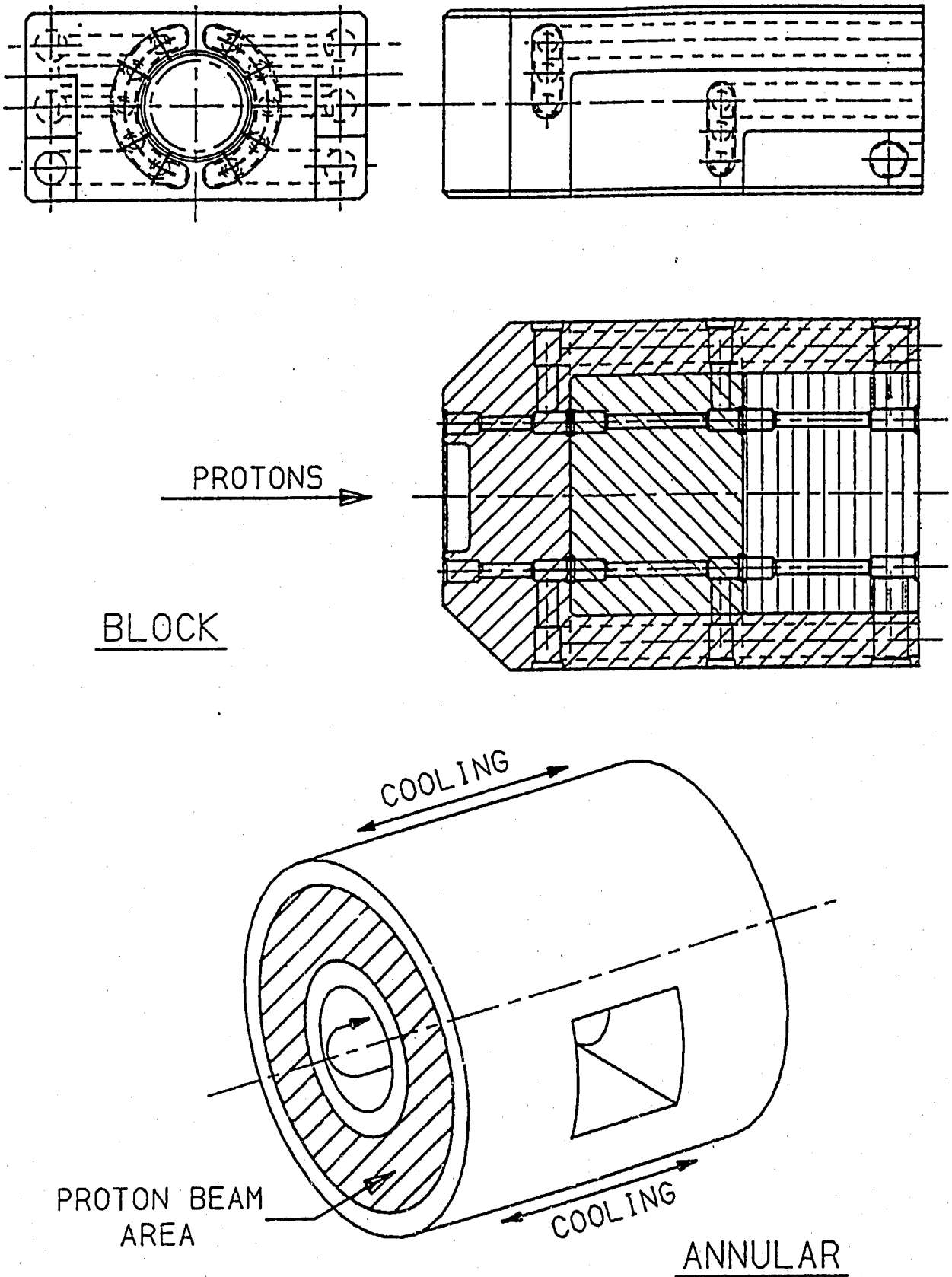
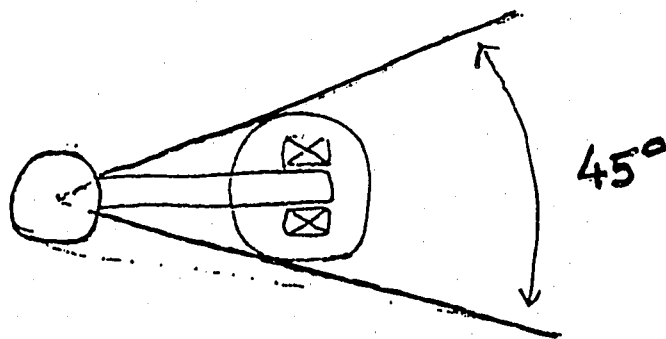
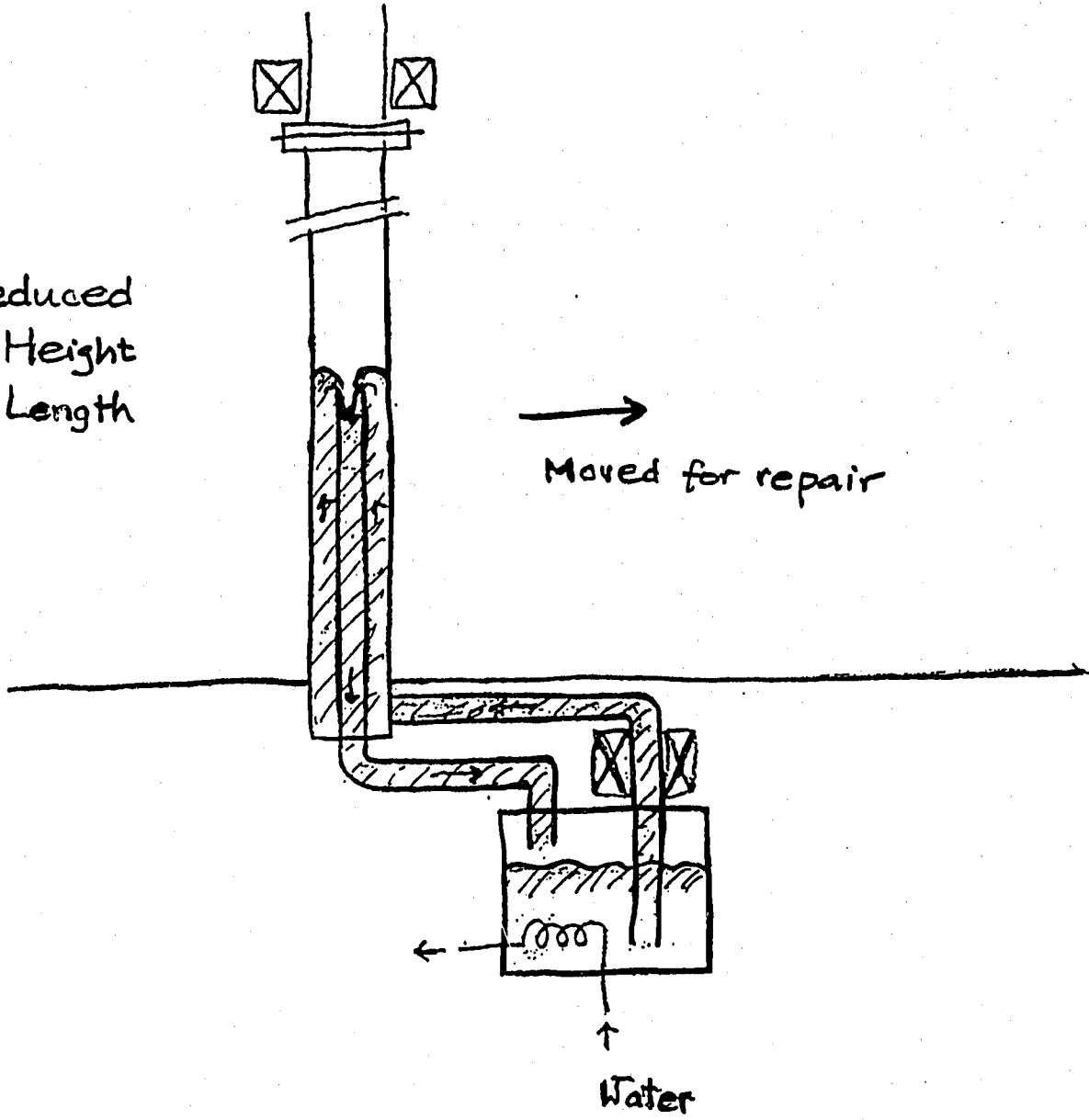


Fig. 1b TARGET CONCEPTS

Report of the Target Working Group 2: Homogeneously cooled liquid target

1	Introduction	41
2	Cylindrical liquid metal with vertical beam injection from above	44
3	Rotating wheel target with horizontal beam injection	46
4	General comments and supplementary remarks	41
	Neutronic Performance of Liquid Metal Targets	52

Reduced
• Height
• Length



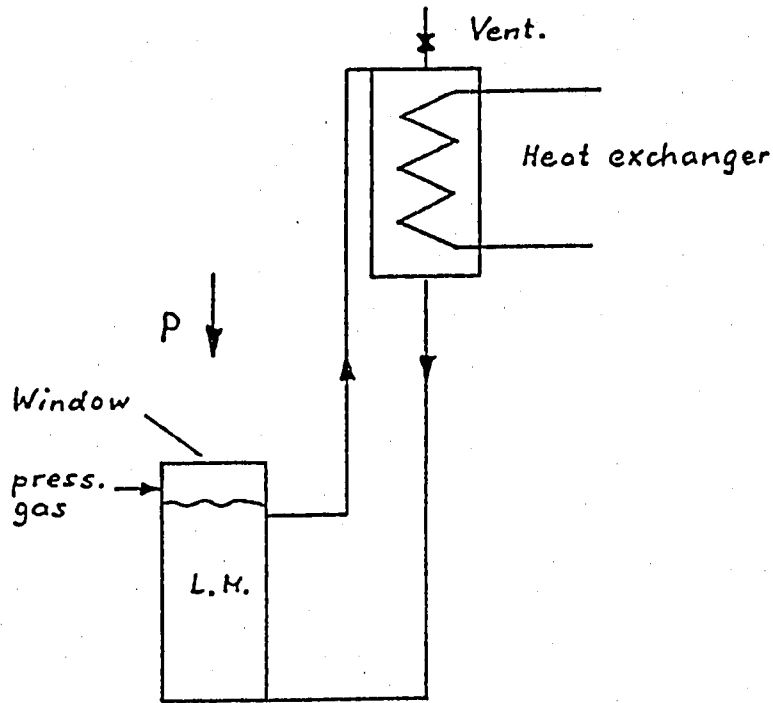


Figure 3: Natural-Convection Liquid-Metal Target with Vertical Injection from above

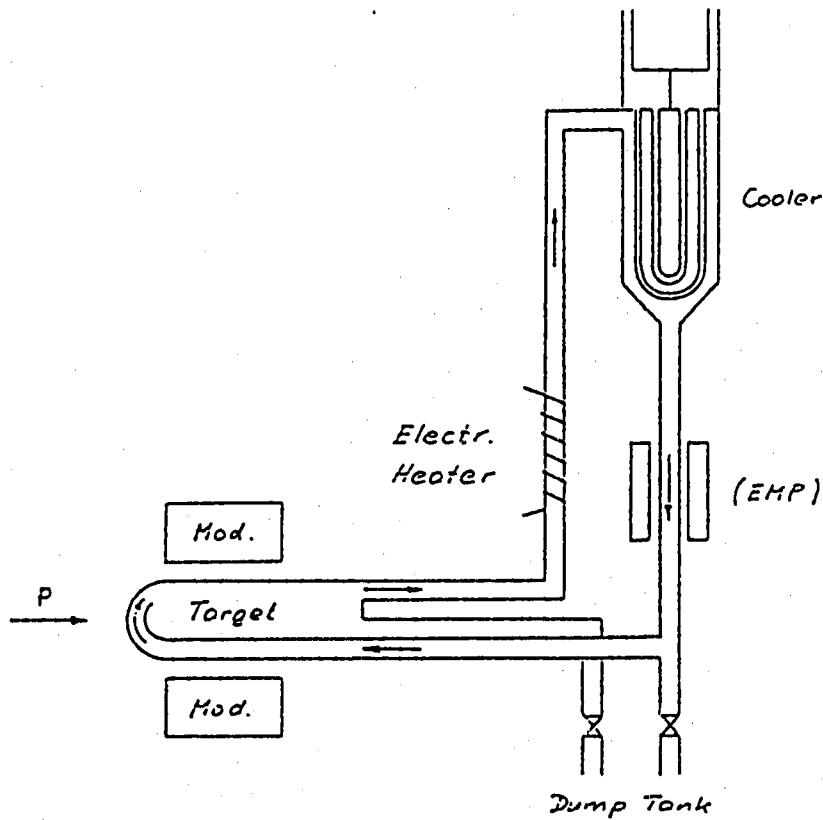
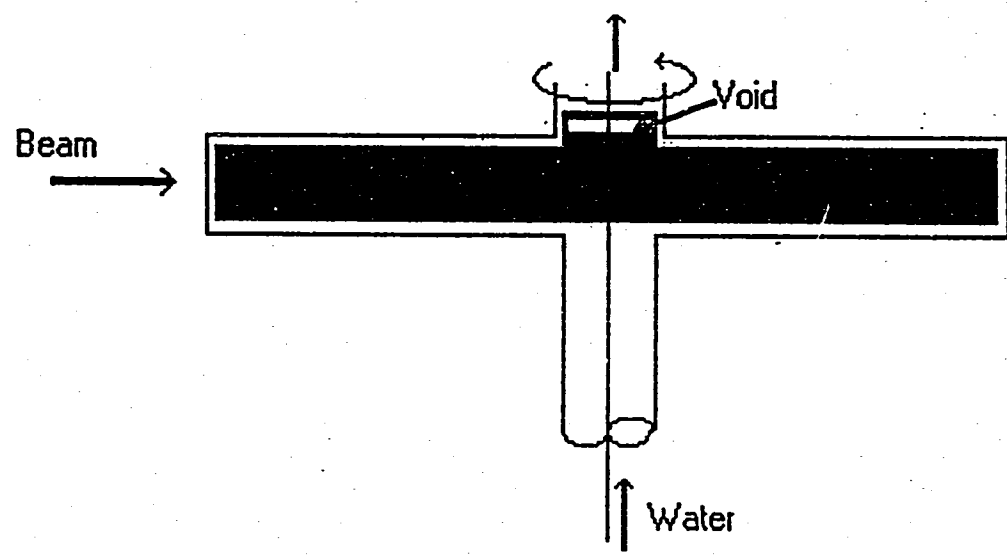
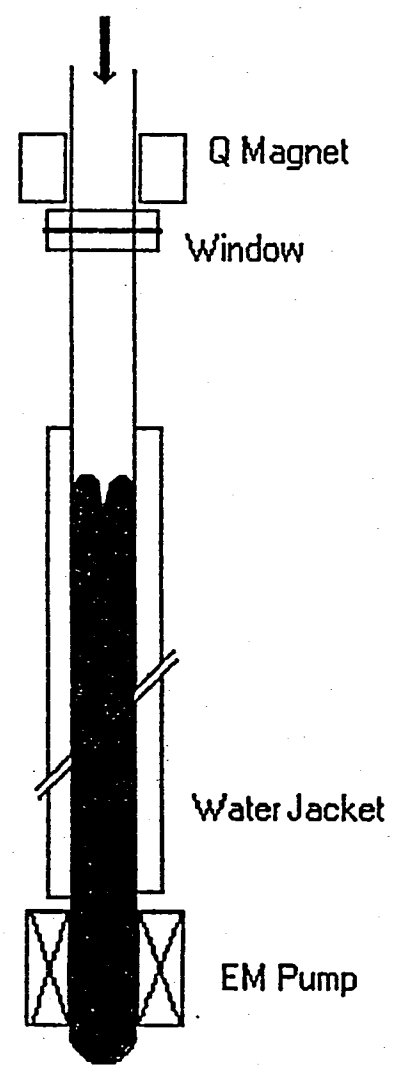


Figure 4: Horizontal Liquid-Metal Target with Natural or Forced Circulation



Rotating wheel with Hg
No structure inside
Reduced load on window
Horizontal beam injection



No contact : Liquid Metal - Window
Beam : Possible to focus behind window
Window : Exchangable

Hg : Low Op. Temp.
High Density
No need of Aux. Heating

Pb : Feasible

SNQ
(KFA)

SPN-190

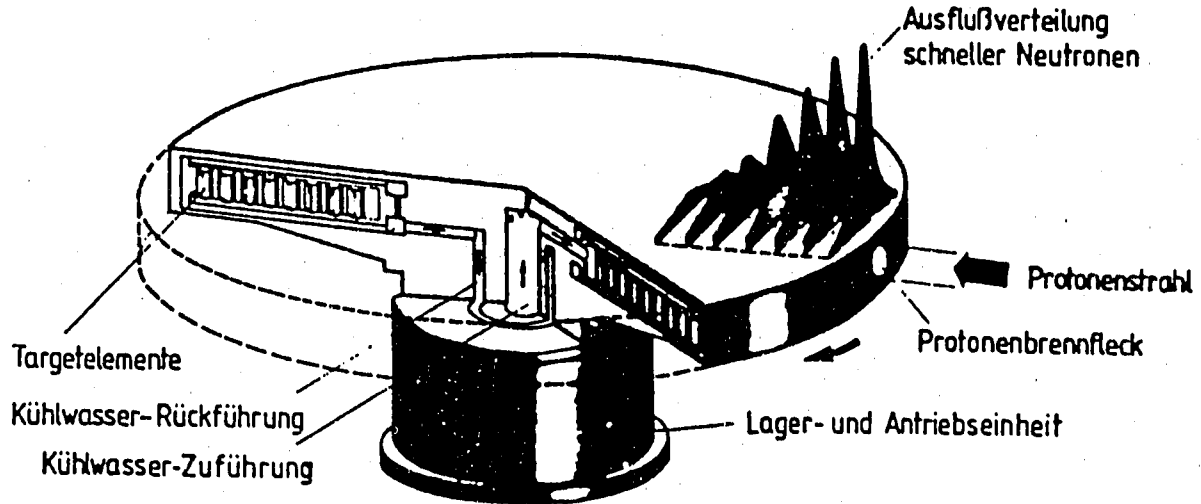


Abb. 2-24
Schematische Darstellung einer rotierenden Targetanordnung. Der durch die Radperipherie eintretende Protonenstrahl setzt im Targetmaterial Neutronen frei, die in der angedeuteten Weise aus der Oberfläche austreten. Das Kühlwasser wird durch die Nabe zu- und abgeführt und umspült die einzelnen zylinderförmigen Targetelemente.

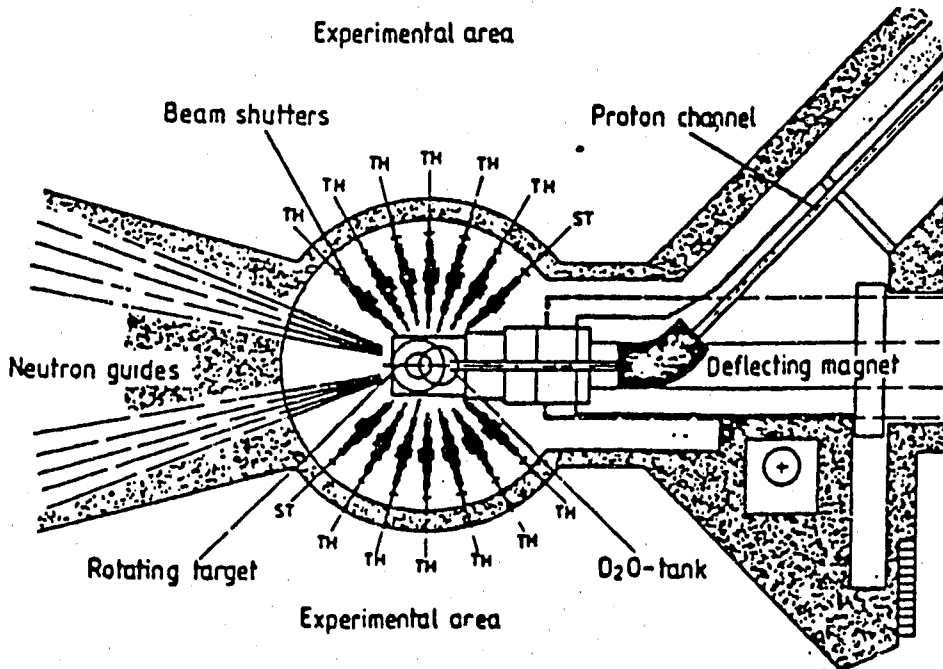
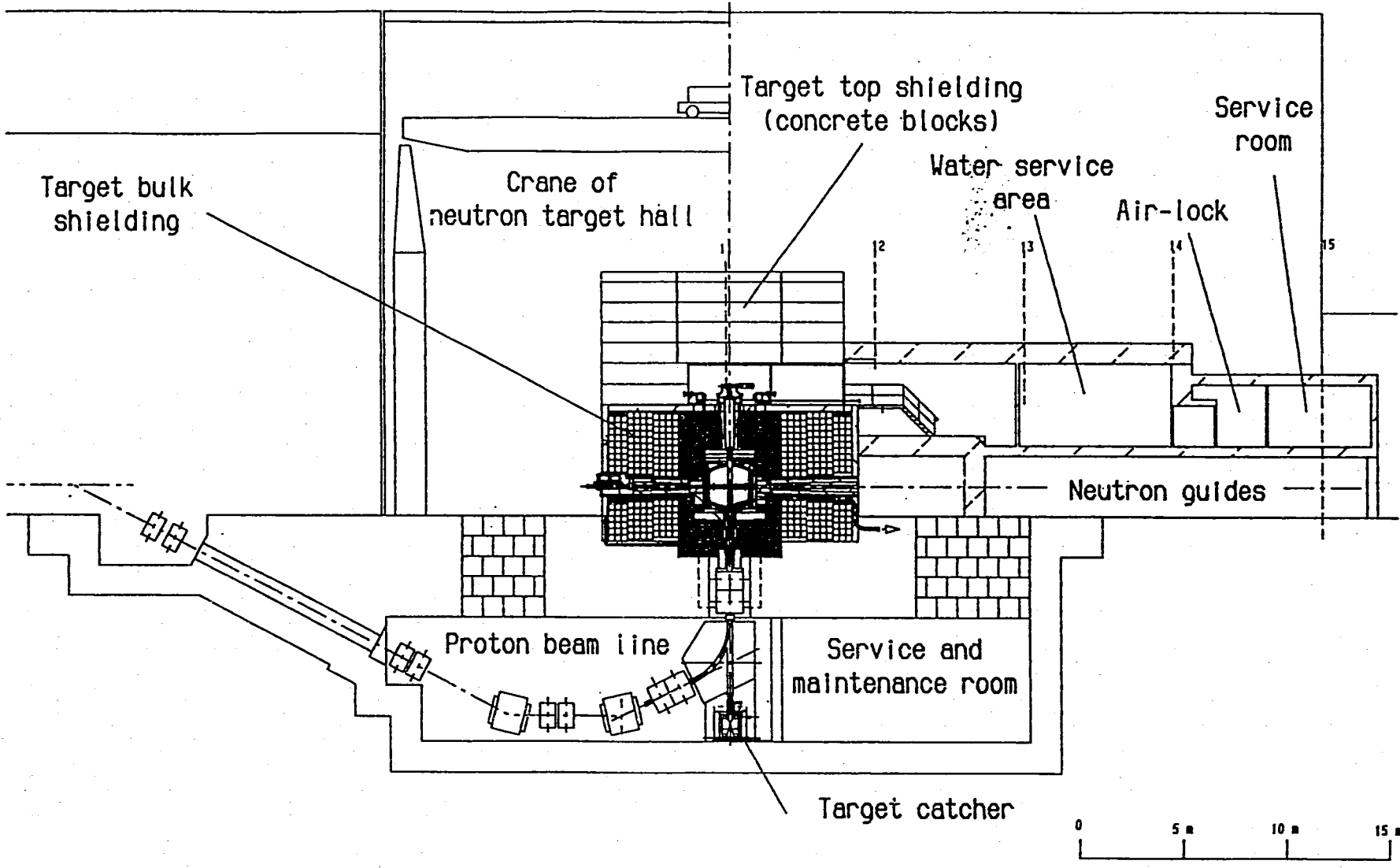


Fig. 6
Horizontal section through the target block of DIANE, showing the arrangement of beam tubes and neutron guides (TH = thermal, ST = subthermal neutrons).



The SING facility

89-09-05 8U/82

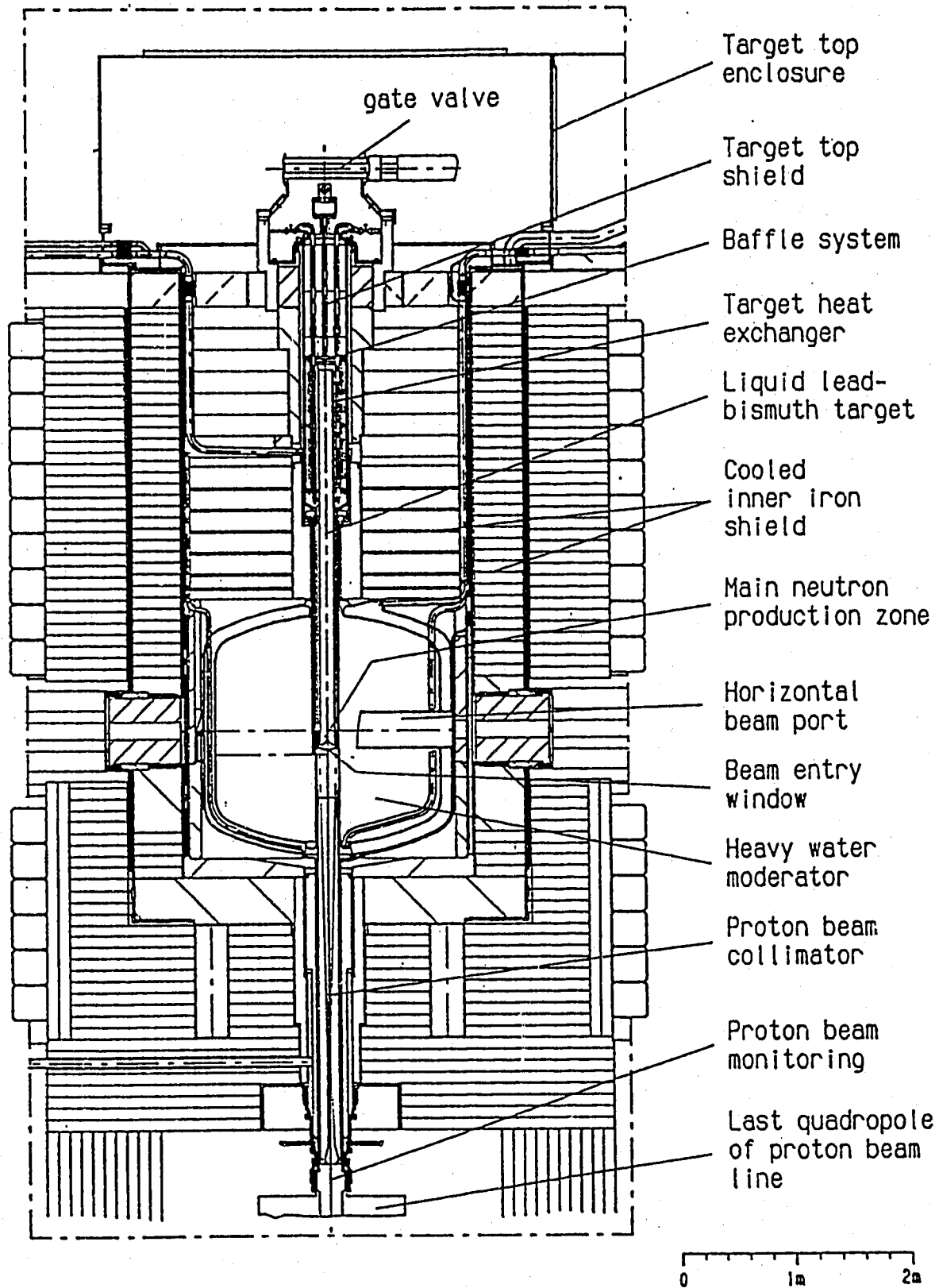
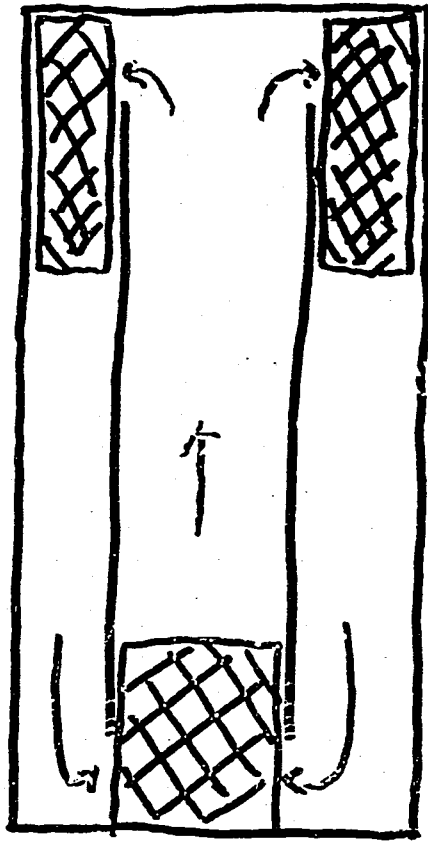


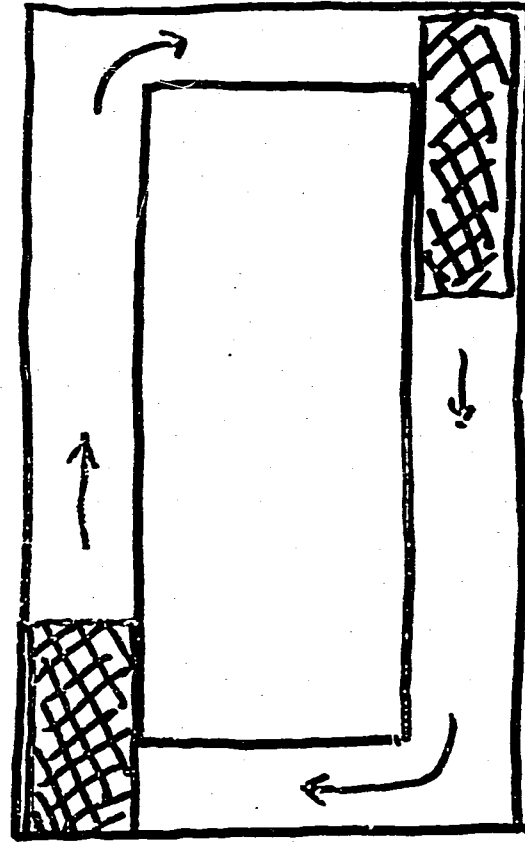
Fig. 9

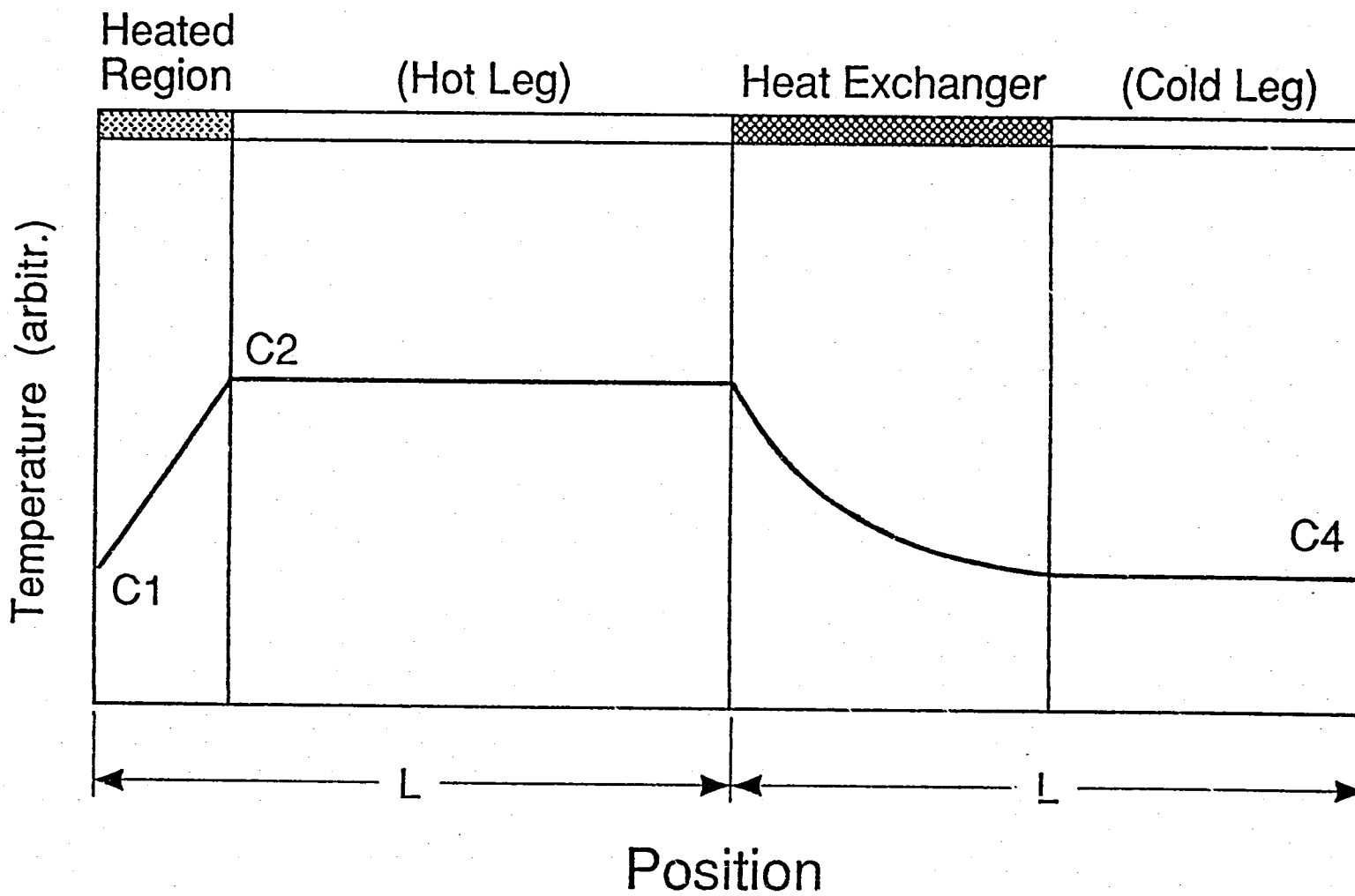
Vertical section through the inner part of the SINQ target block, showing the double walled D₂O-tank and the partially cooled, layered inner iron shield.



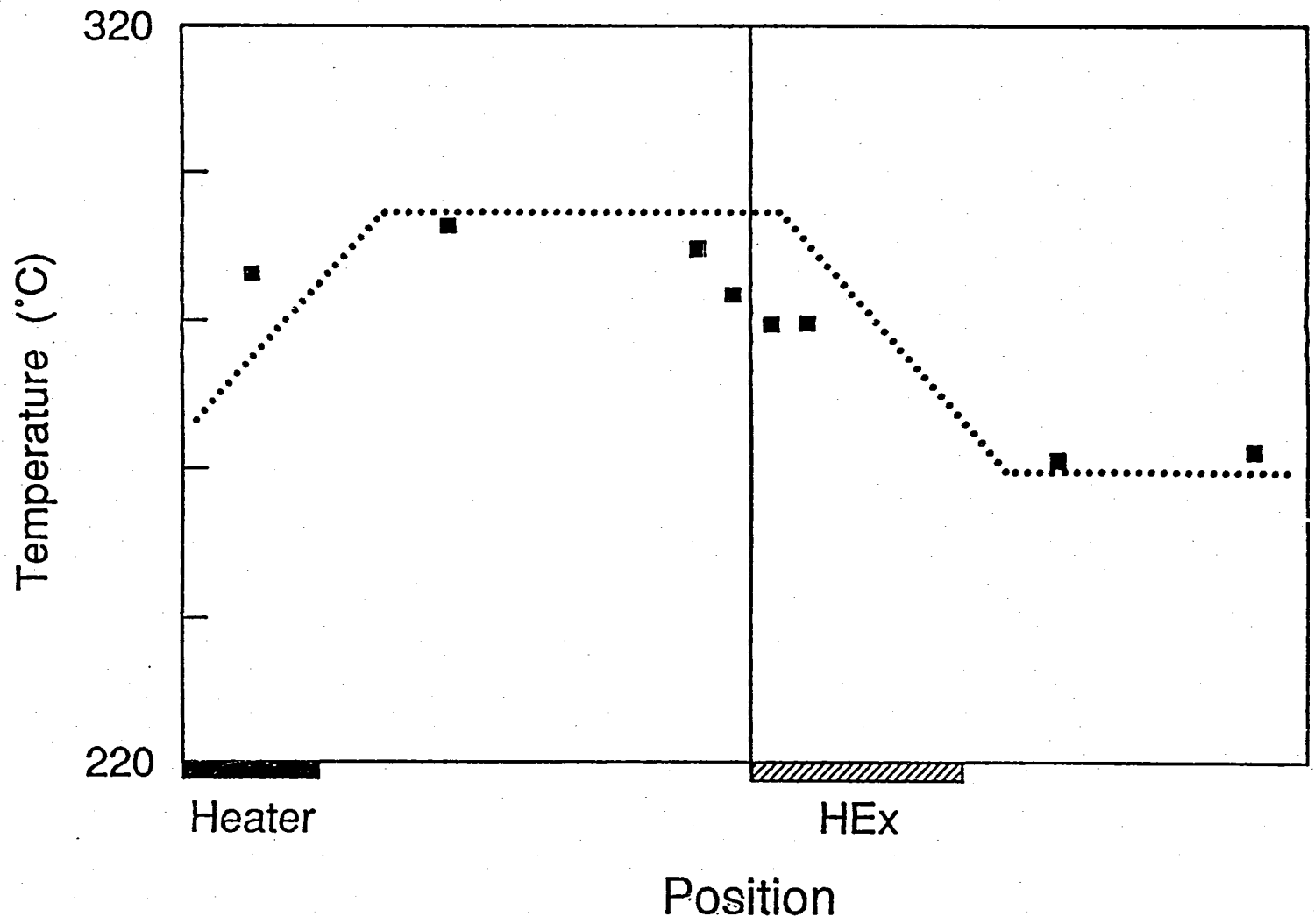
Heat Sink

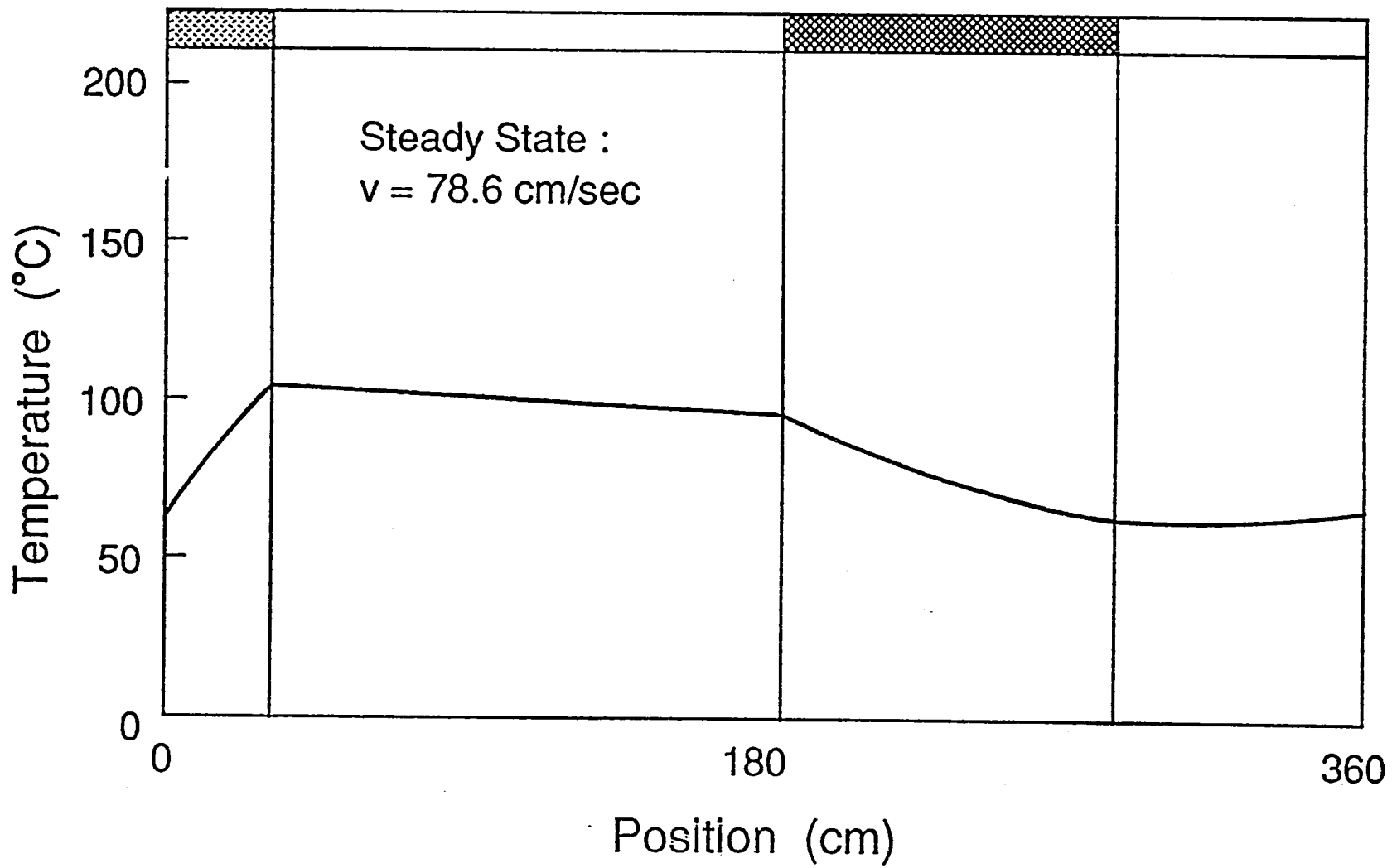
Heat Source

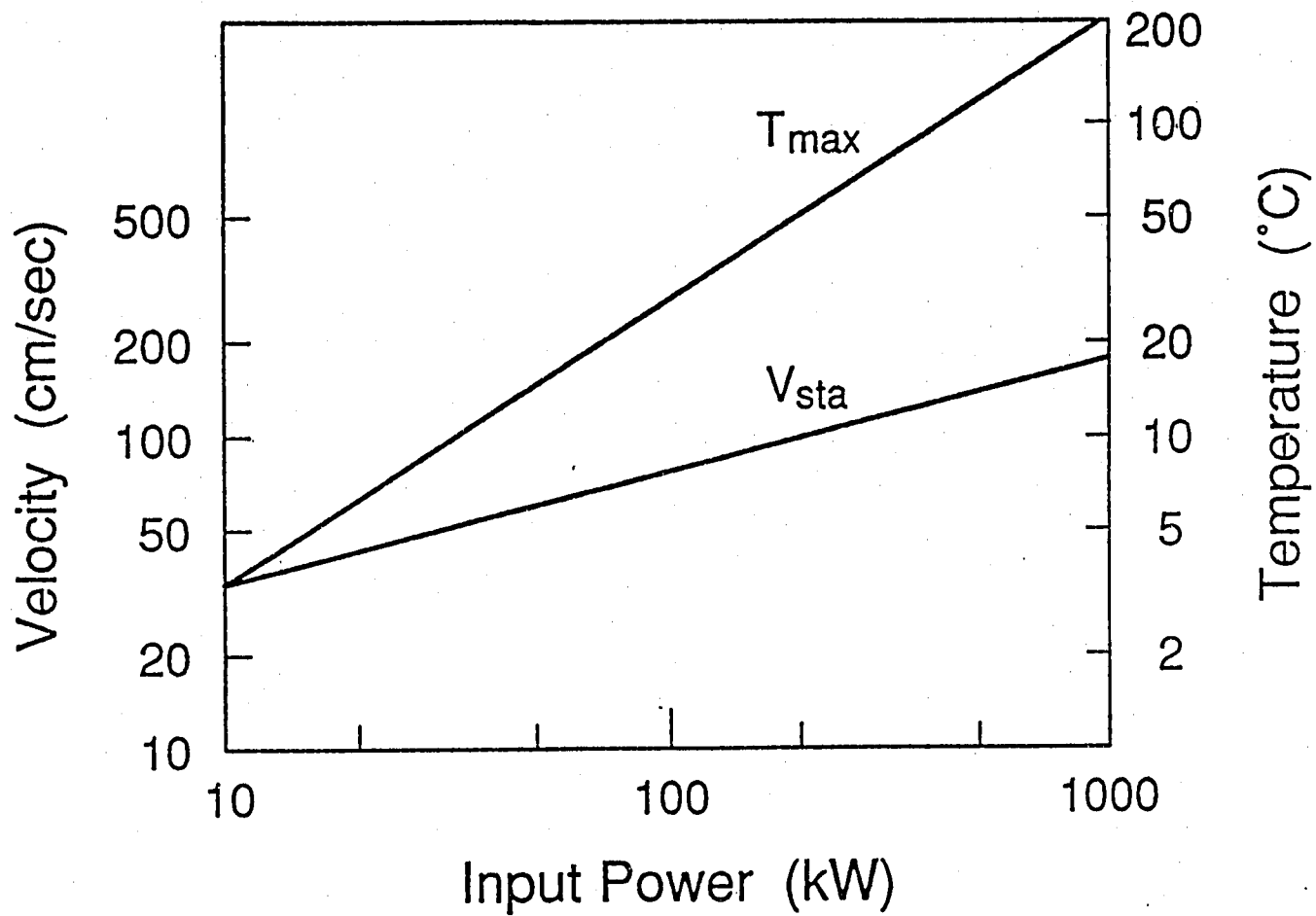




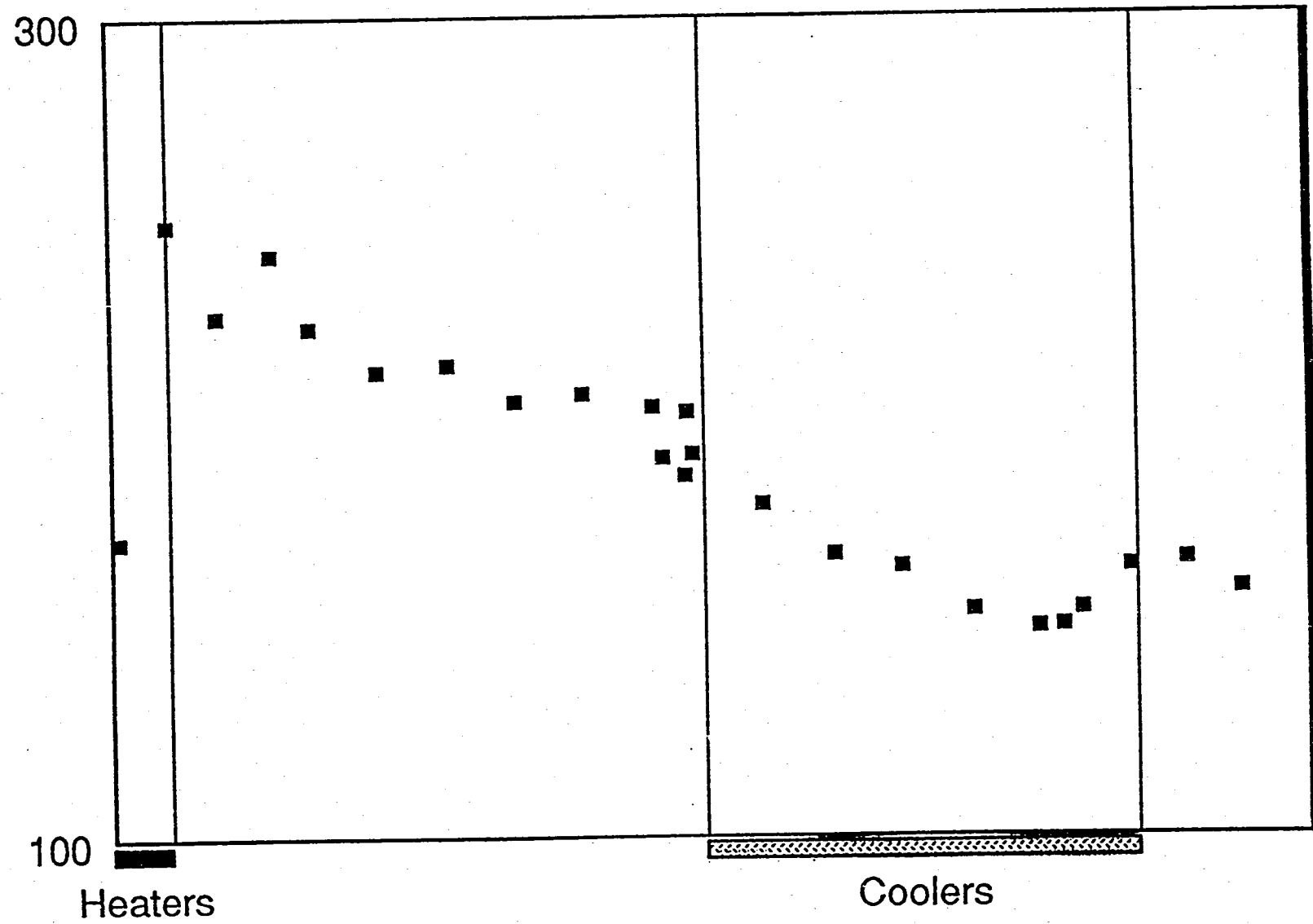
Comparison of Vertical Temperature Distribution (SSE, 13.8kW)







Vertical Temperature Distribution (Q=60.5 kW)



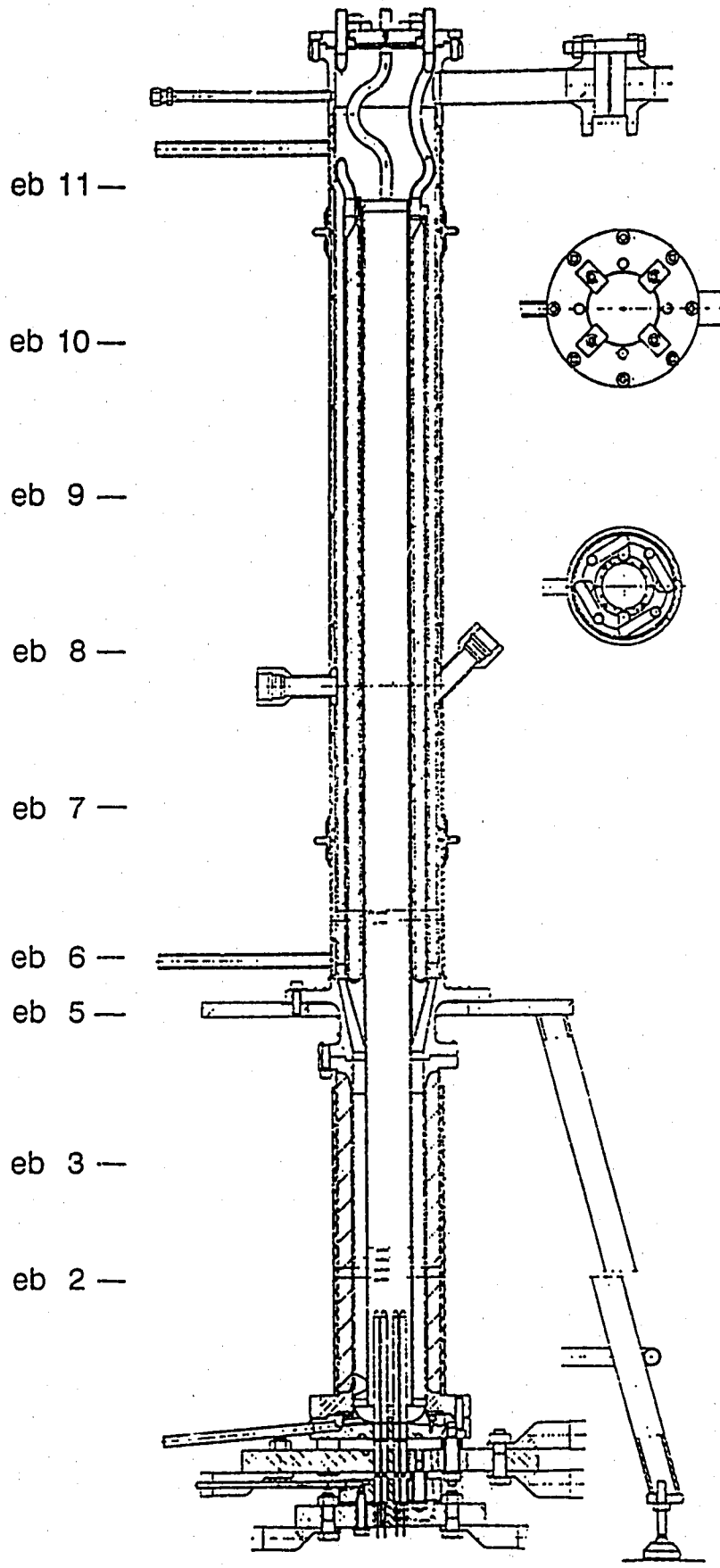
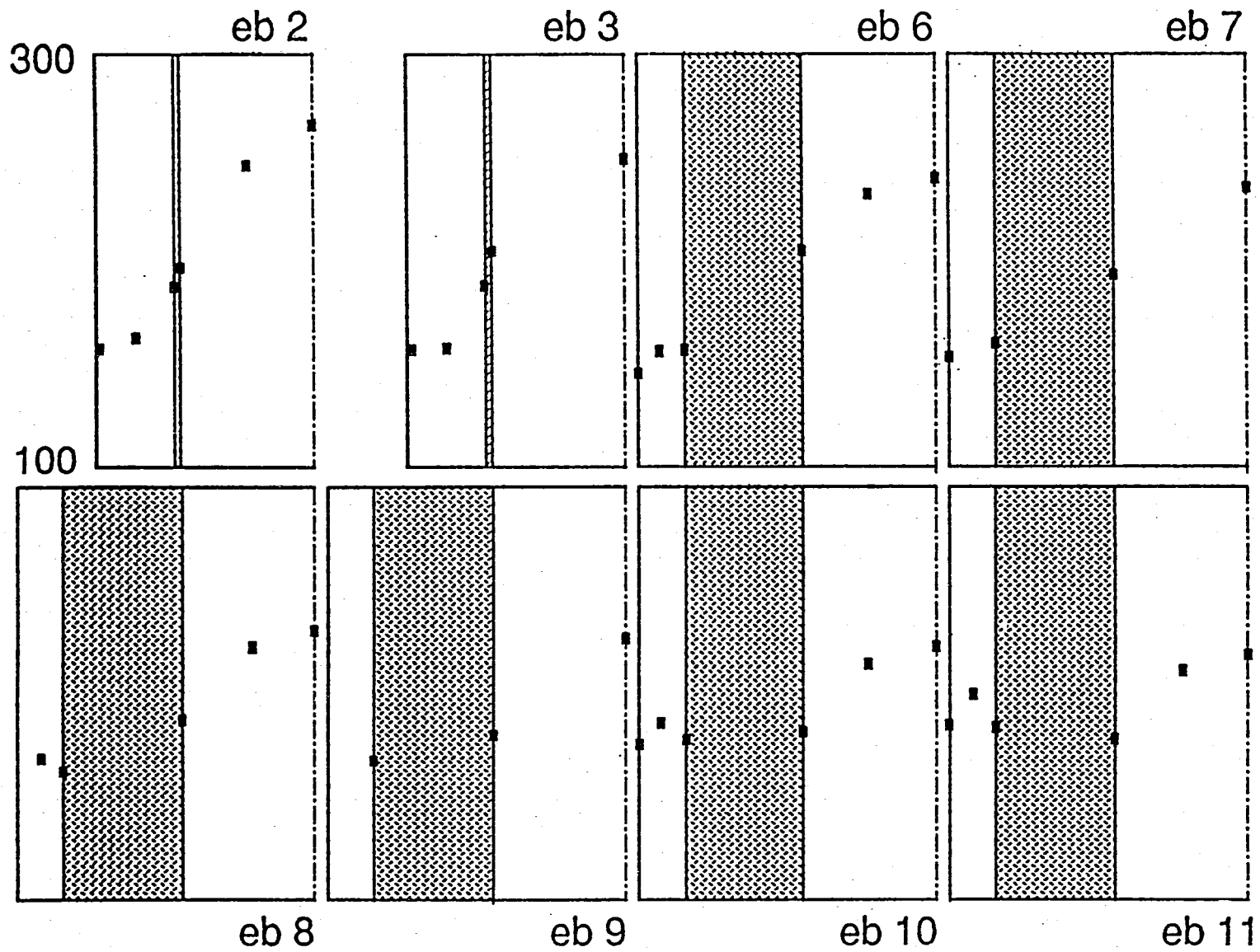
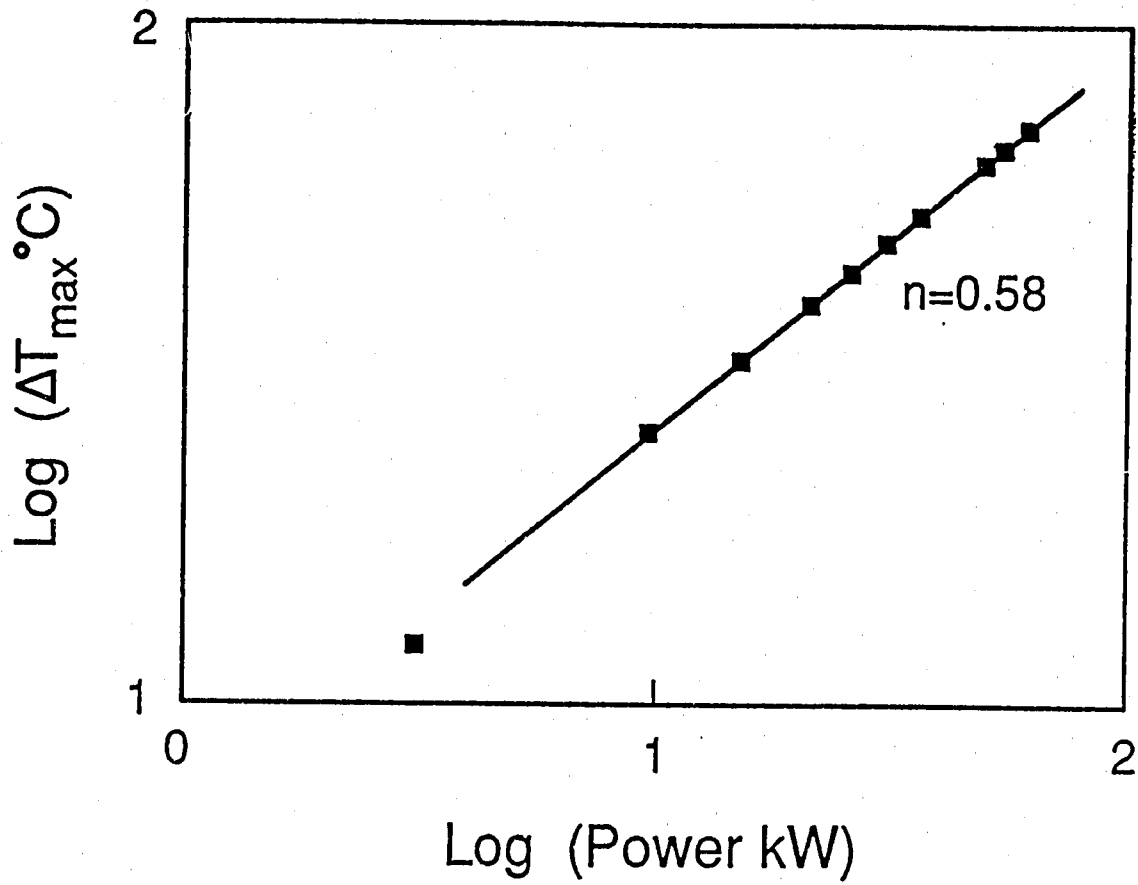


Fig. 11

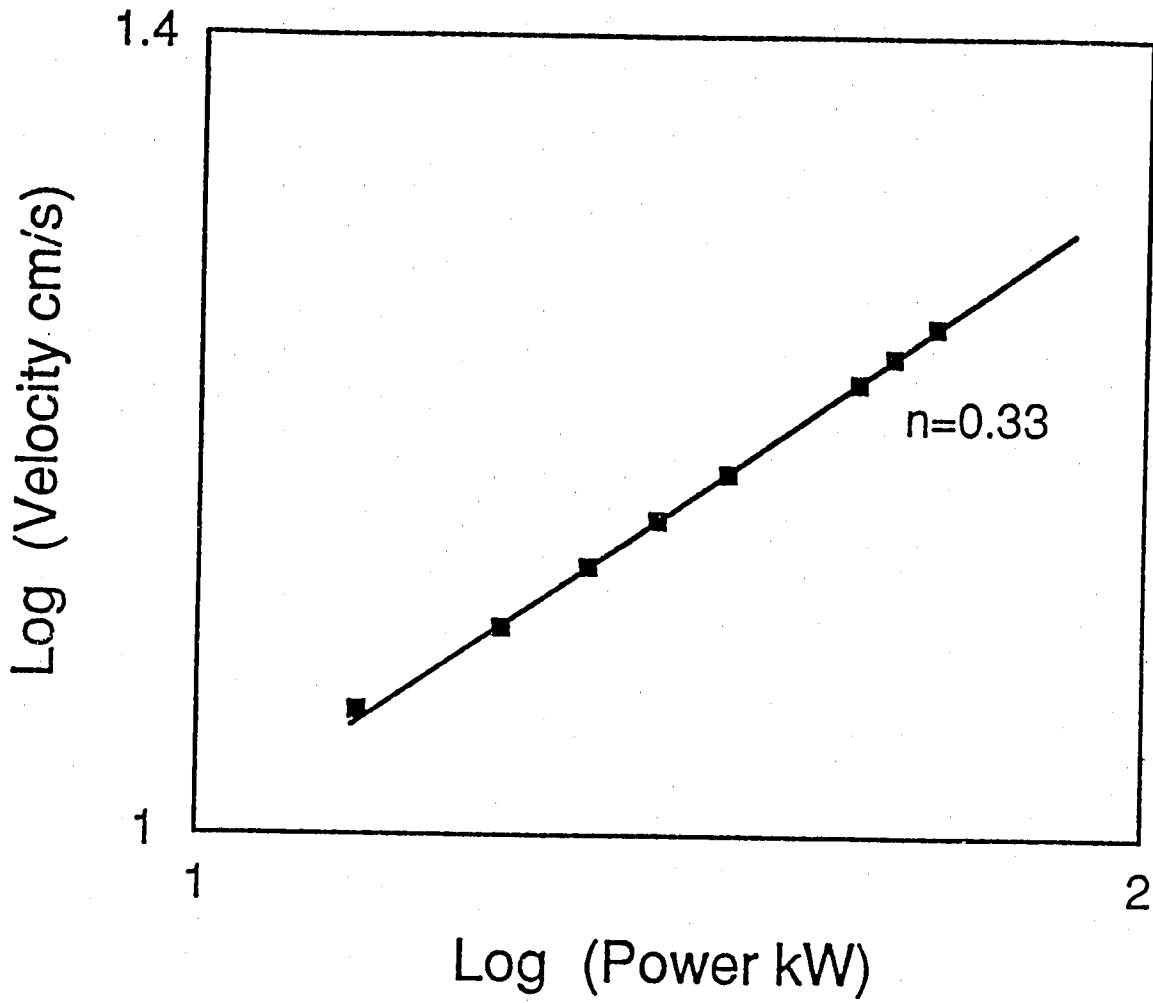
Horizontal Temperature Distribution (Q=60.5 kW)



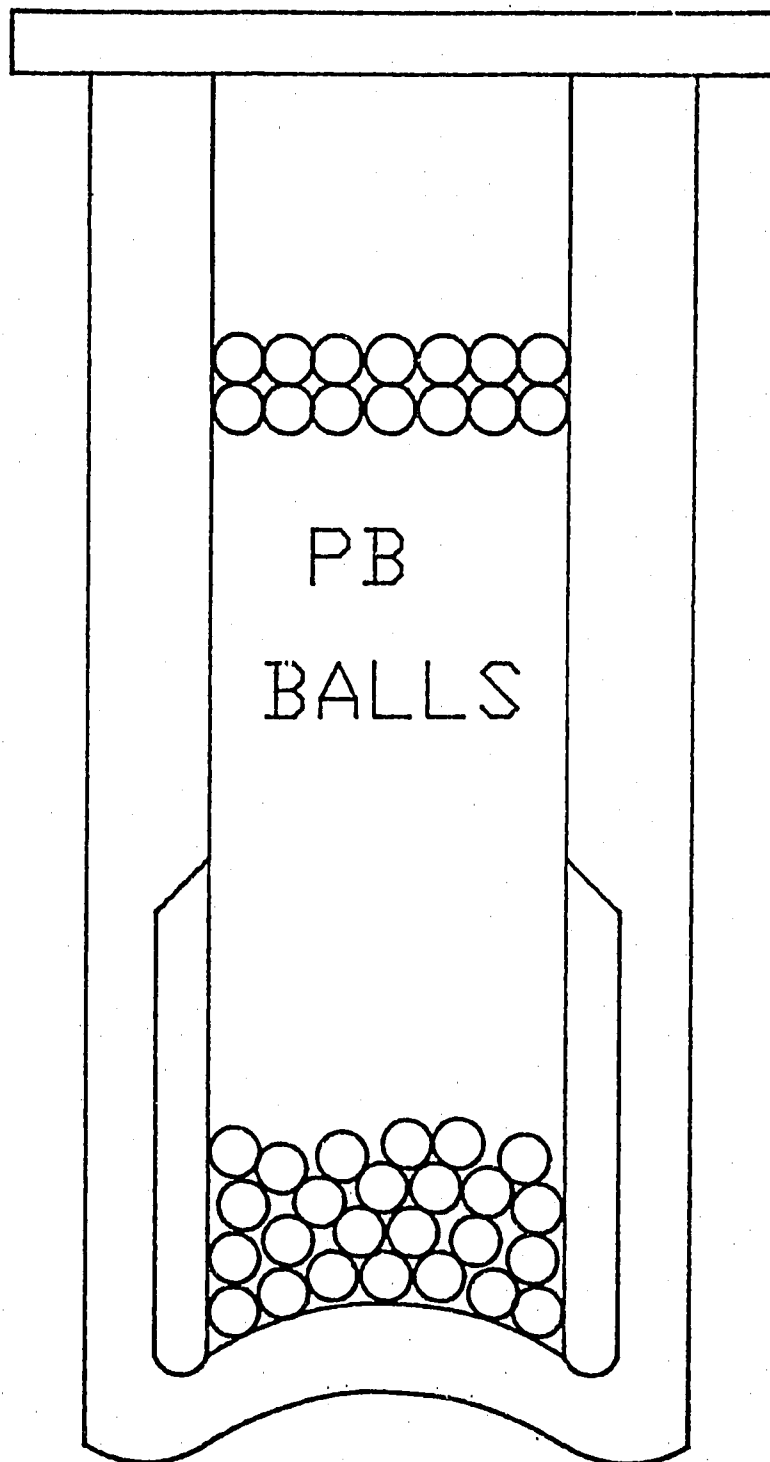
Maximum Temperature Difference vs Input Power



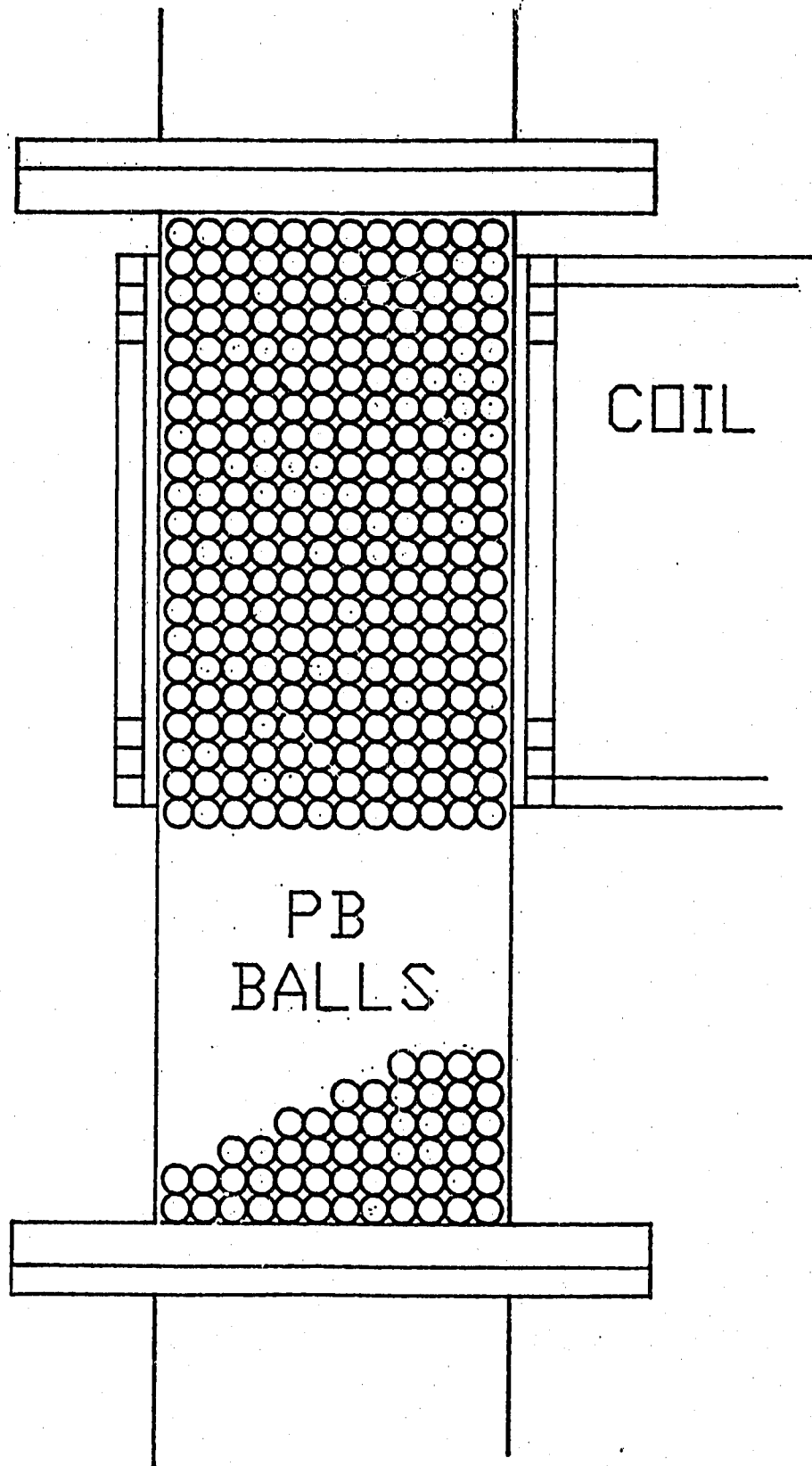
LBE Velocity vs Input Power



POROUS MEDIA



POROUS MEDIA



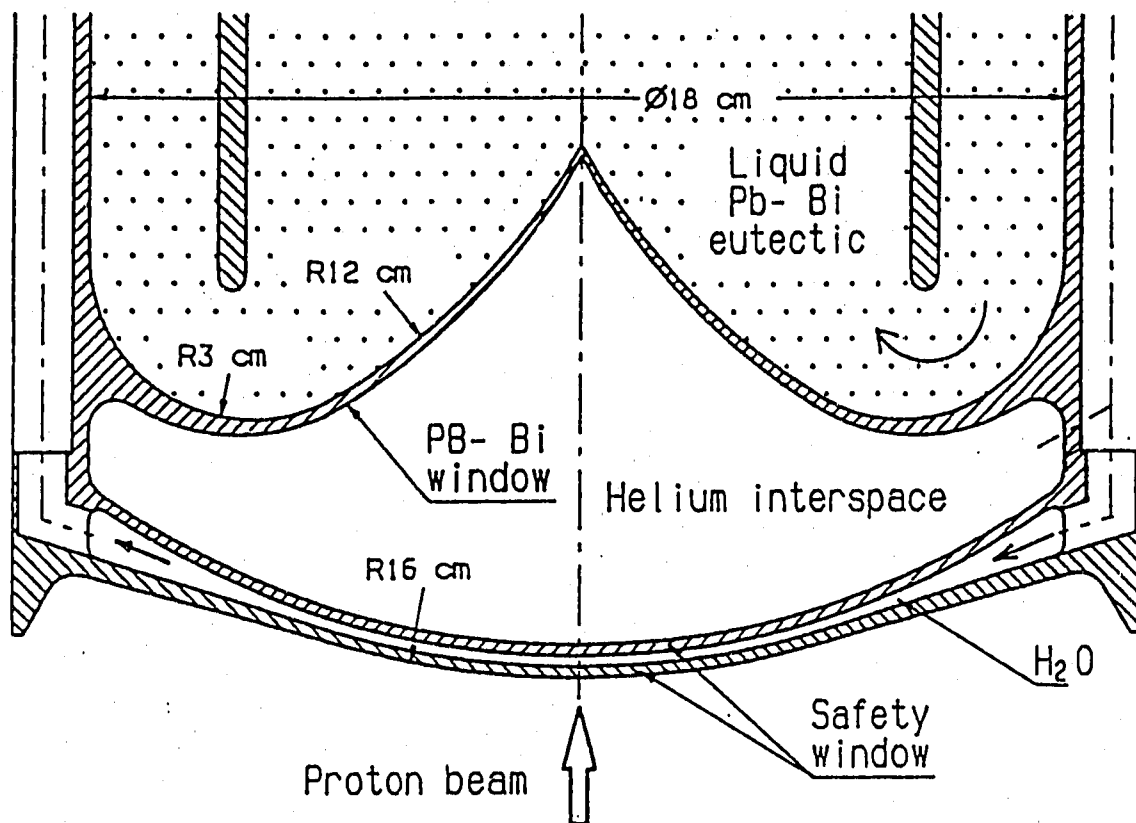


Fig. 2 SINQ-target window assembly.

Technical data and parameters for the window are given in Table 1.

The shape of the Pb-Bi window is determined by thermohydraulic considerations to give:

- good heat-transfer in the central (beam-heated) region of the window
- low pressure loss in diverting the flow of the Pb-Bi upwards into the guide-tube.

The selection of the window element thicknesses and thickness-profile depends on:

- the maximum stress (because of the three-dimensional loading, this is based on the von Mises stress) compared with the yield stress under the various operating conditions, bearing in mind all temperature gradients.
- Pressure differentials.

The safety window is cooled by a transverse flow which enters through a series of holes at the rim.

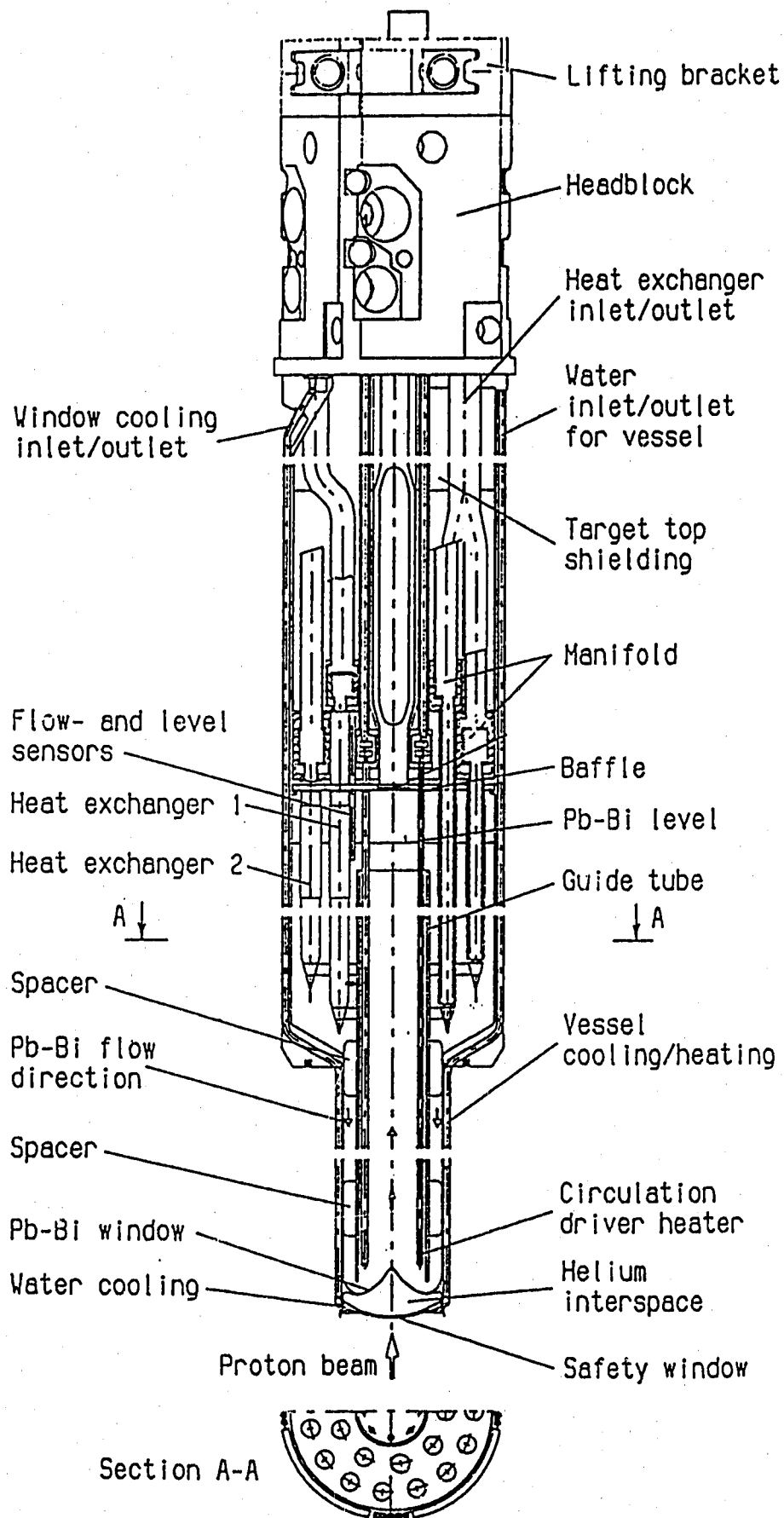


Fig. 2

Layout of the SINQ target

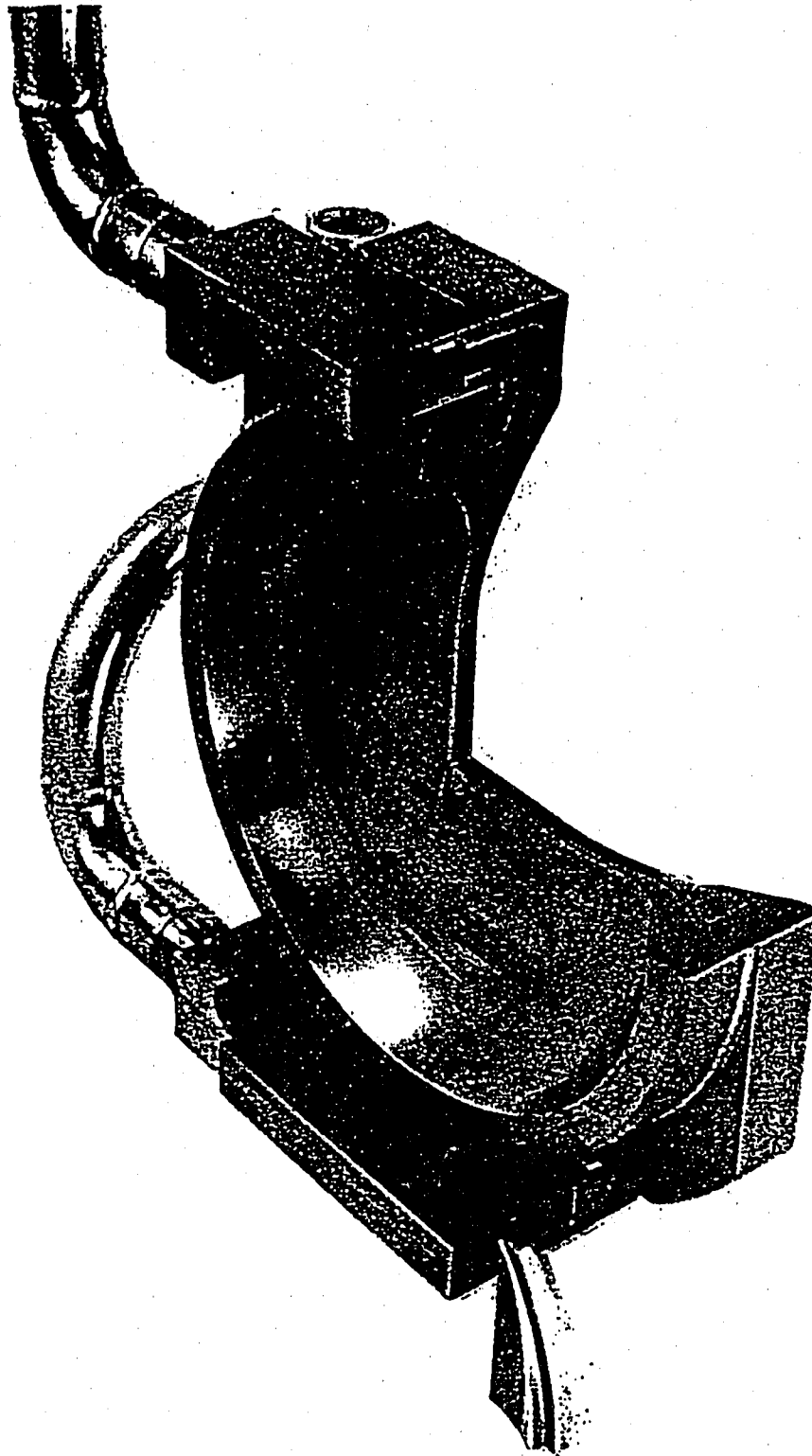


Fig. 4 Photograph of a cut-away model of the lifetime-test window mounted at LAMPF radiation effects facility. The small item standing beside the window is part of the wedge-shaped flow guide.

Works at PSI (SINQ Target R&D group : Takeda)

Target Development

- * Natural convection in a tall cylinder (Water) (Exp. & Num.)
- * Natural circulation in a concentric cylindrical loop container
 - Water (2m)
 - LBE (SSE : 80 cm)
 - LBE (MUP : 170 cm)
- * Heat transfer of Porous medal target with internal heat generation

- * Flow around beam entering windows
- * Flow of window cooling channel

- * Water injection into liquid LBE
- * Material test

Development of UVP

- * Steady pipe flow
- * Recirculating flow in a square cavity
- * Natural convection flow mapping in a slab model of FBR (KfK)
- * Flow in a rotating cylinder
- * Flow of Hg at room temperature
- * Flow of LBE at high temperature
- * Oscillating pipe flow

- * Flow around beam entering windows [Geometry optimization]
- * Flow of window cooling channel

Fluid Dynamics

- * Taylor-Couette flow
- * Flow instability in Cz-puller (Tokuhiro)
- * Round free jet

付録 3

加速器利用検討会中間報告
(平成5年度第1回技術会議OHP)

加速器利用検討委員会中間報告

技術会議(第1回)平成5年5月20日(木)

Copyright © 1993 Your Company Name. All trademarks appearing in this document are the property of their respective owners.

詳細についてのお問い合わせは下記をお願いします。

動力炉核燃料開発事業団
先進技術開発室
0292-67-4141

Apps-1

1.はじめに

1) 加速器利用委員会発足

加速器開発

- OMEGA(Options Making Extra Gains from Actinides)計画
- 加速器よる核廃棄物の消滅処理
- 大電流加速器の開発

加速器利用

- ➡ • 10MeV、20mA 電子線形加速器からのビーム利用

Apps-2

構成員

主査 江本 隆(先進)
副主査 鳥居 建男(放管)

委員	中島 尚子(安対)	橋本 周(放管)
	根岸 仁(研管)	武井 早憲(先進)
	大村 明子(先進)	木曾原 直之(機器)
	小井 衛(材料)	山田 美一(ADS)
	小山 真一(AGS)	赤坂 尚昭(MMS)
	立邊 和明(FMS)	北村 了一(照射)
	清野 裕(P安)	北谷 文人(東海・先端)

App-3

2) これまでの活動

- 4/7 第1回検討会 :PNC加速器の特徴把握、活動計画検討
- 4/10 第2回検討会 :自由電子レーザーと低速陽電子利用の講演
榎本教授(高エネルギー物理学研究所)
- 4/11 第3回検討会 :大電流電子ビームの放射線利用の講演
中村教授(東北大)
ワーキンググループの設置検討
- 5/2 第4回検討会 :ターゲットの構造と利用の講演
武田博士 (スイスPSI)
ワーキンググループ中間報告(1)
- 5/3 第5回検討会 :ワーキンググループ活動報告
- 5/5 第6回検討会 :ワーキンググループ中間報告(2)

4/10/8 自由電子レーザ・遠赤外光の利用:鳥塚教授(日大)黒田教授(東大)

App-4

3) ワーキンググループ

1. 応用技術検討WG

自由電子レーザー・低速陽電子による物性研究

2. 照射利用検討WG

高温・高放射線場での材料開発

3. 計測技術検討WG

大線量場での放射線計測技術の確立

Apps-5

ワーキンググループの構成

1. 応用技術検討WG

GL 武井 早憲(先進)
根岸 仁(研管)
小山 真一(AGS)
清野 裕(P安)
北谷文人(東海・先端)

3. 計測技術検討WG

GL 橋本 周(放管)
木曾原 直之(機器)
山田 美一(ADS)
大村 明子(先進)

2. 照射利用検討WG

GL 小井 衛(材料)
中島 尚子(安対)
赤坂 尚昭(MMS)
立邊 和明(FMS)
北村 了一(照射)

Apps-6

2. PNC大電流CW電子線形加速器の概要

1) 加速器開発

大電力・大電流加速器の要素開発及び工学的実証

2) 加速器から得られる放射線の種類、量、スペクトラム

10MeV 20mA の電子線形加速器から利用(発生)できる放射線

制動放射のガンマ線として 吸収線量率 $\sim 4 \times 10^5 \text{ Gy}/(\text{hrs m}^2)$
(ターゲットから1mの位置)

Apps-7

目的 大強度加速器の開発

加速器による核変換等の新技術開発研究

工学施設としての加速器開発

加速器基本性能

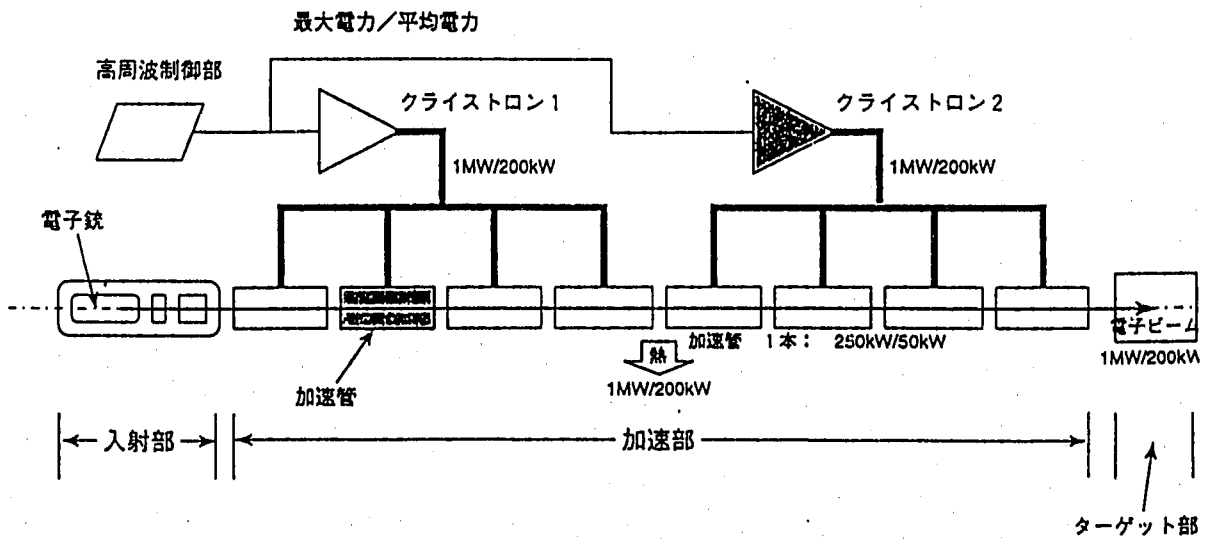
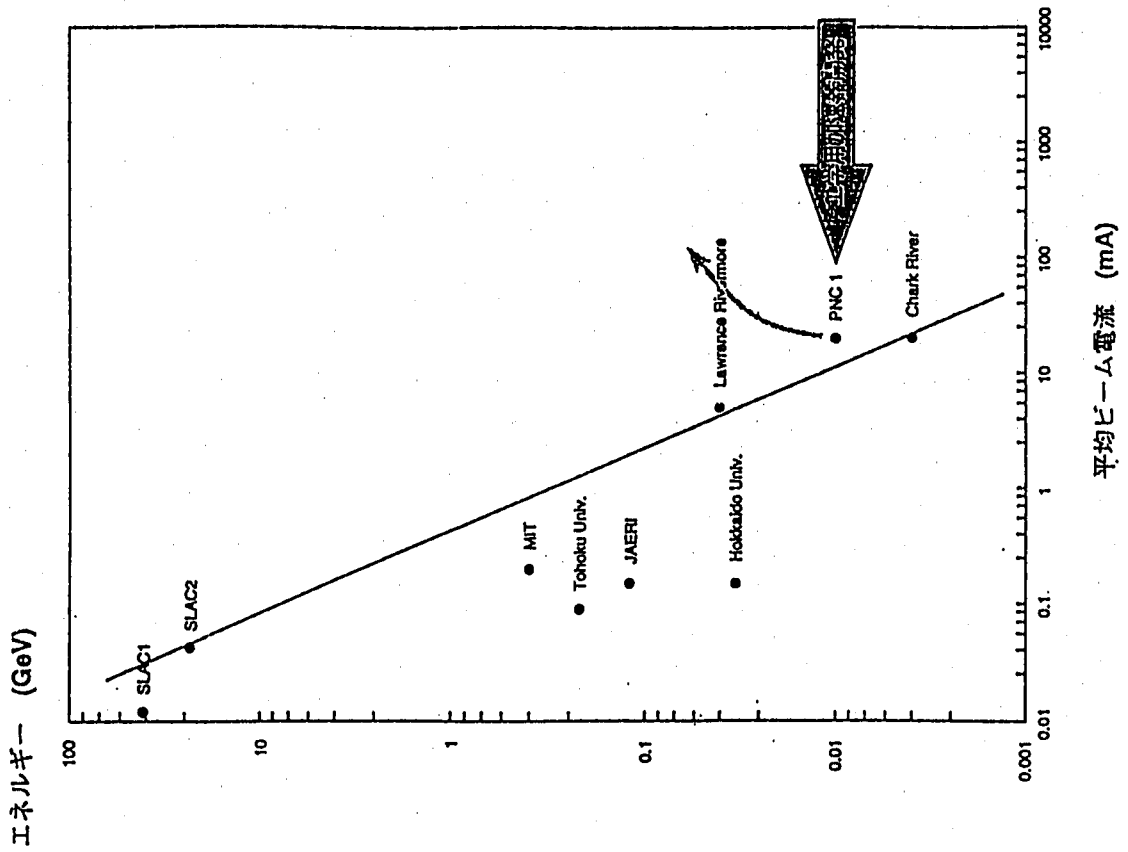
加速ビームの大電流化

要素機器開発

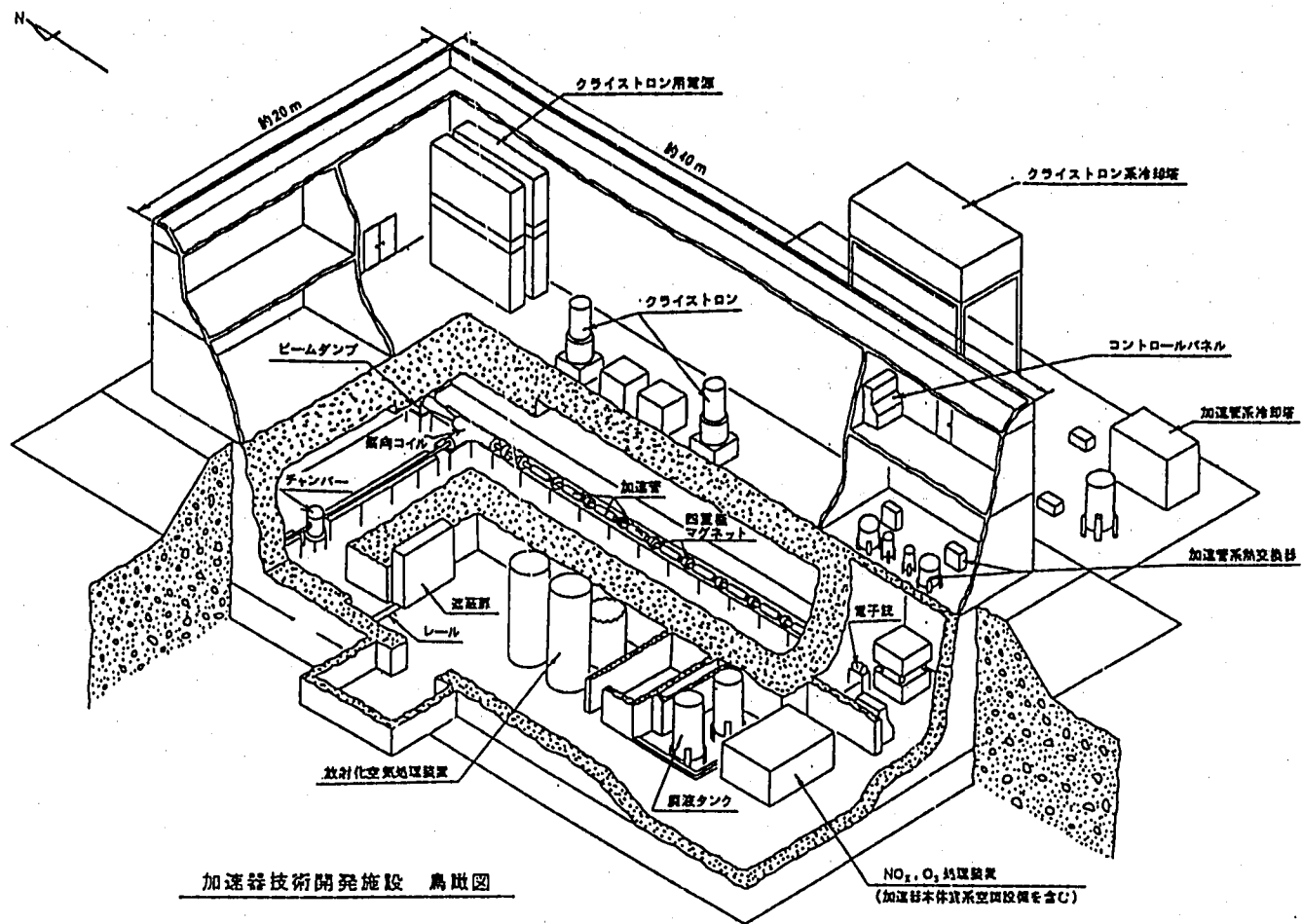
・最大電子ビームエネルギー	10 MeV
・最大/平均電子ビーム電流	100 mA / 20 mA
・電子ビーム電力	200 kW
・加速高周波周波数	1.249 GHz

既存の加速器の100倍
の大電流にすること
を開発目標に設定

世界の代表的電子加速器とPNCの加速器



大強度加速器の基本構成



FTDS-500-001

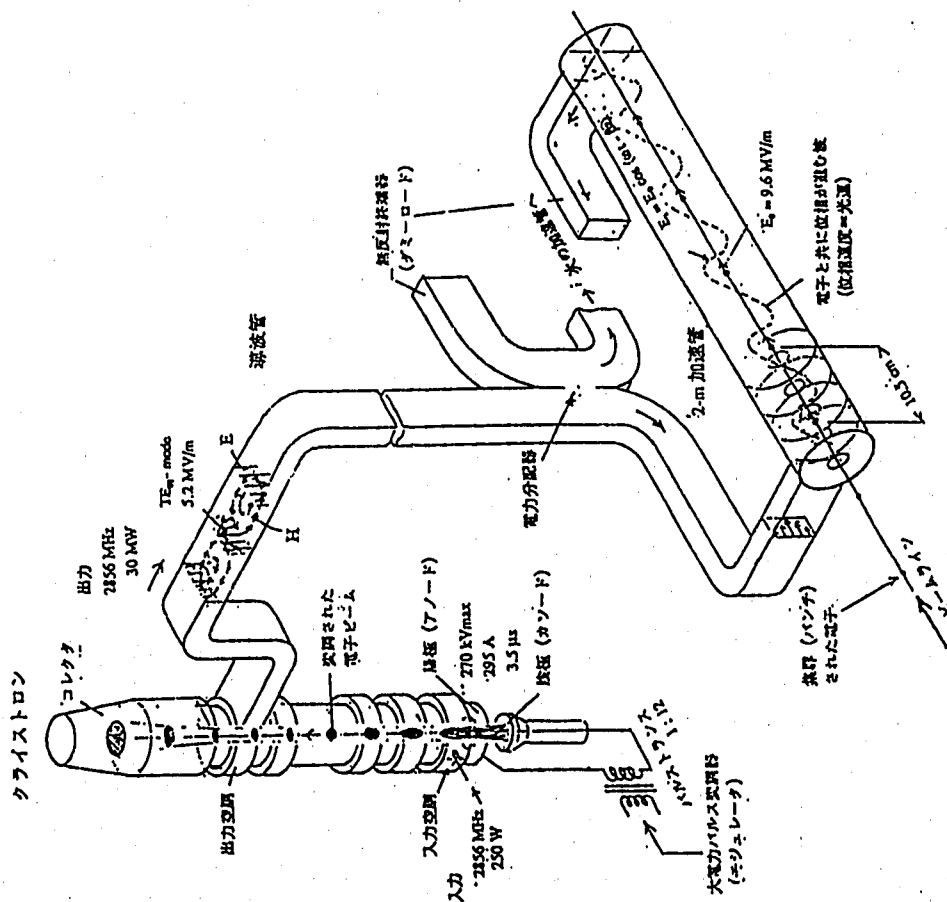
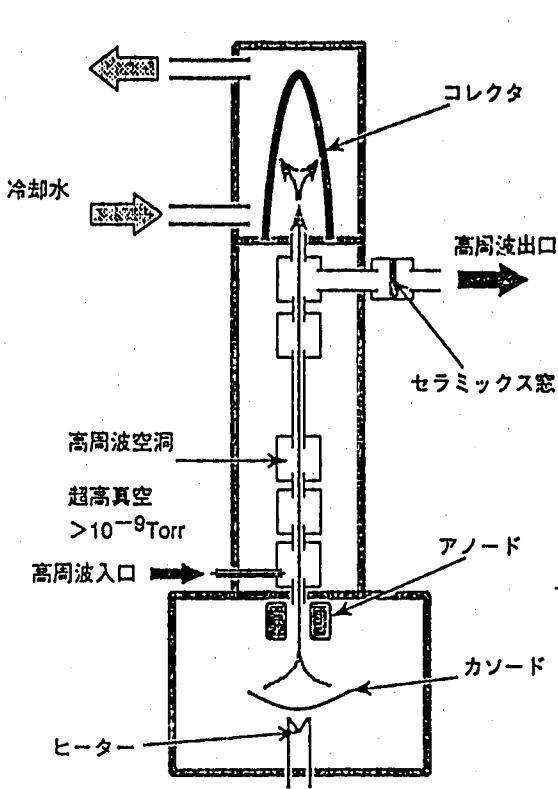


図 1-2-2 電子線形加速器の加速ユニット

今回の開発対象の特徴と主な開発課題

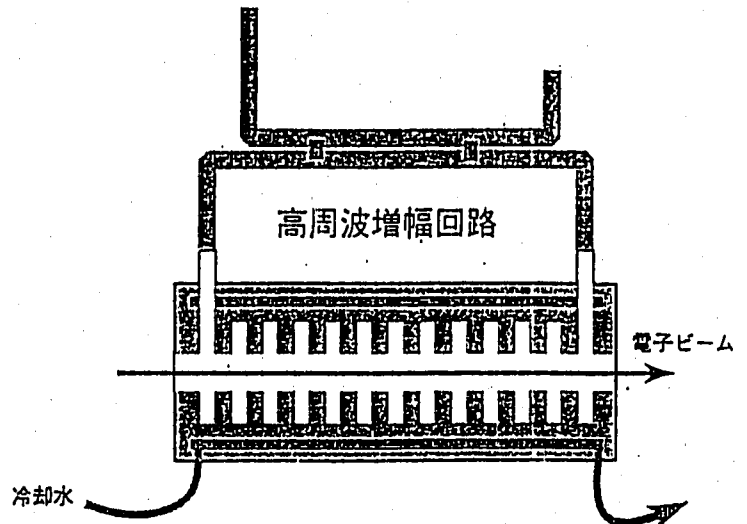


クライストロン

- ・1.2MWの高周波出力は世界最大級
- ・高効率（電力→高周波）の実現

設計目標

平均電力で1.2MW
最大電力で4.2MW

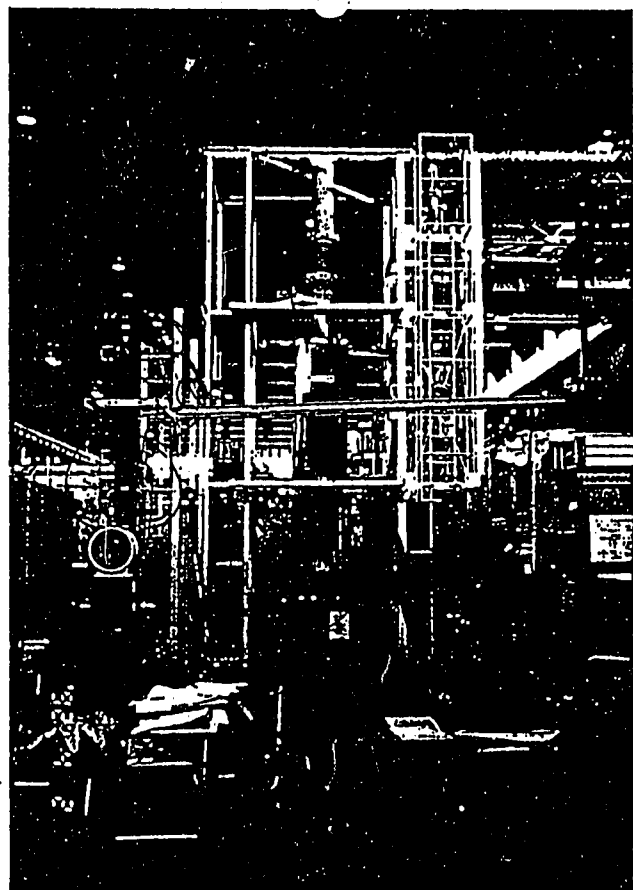


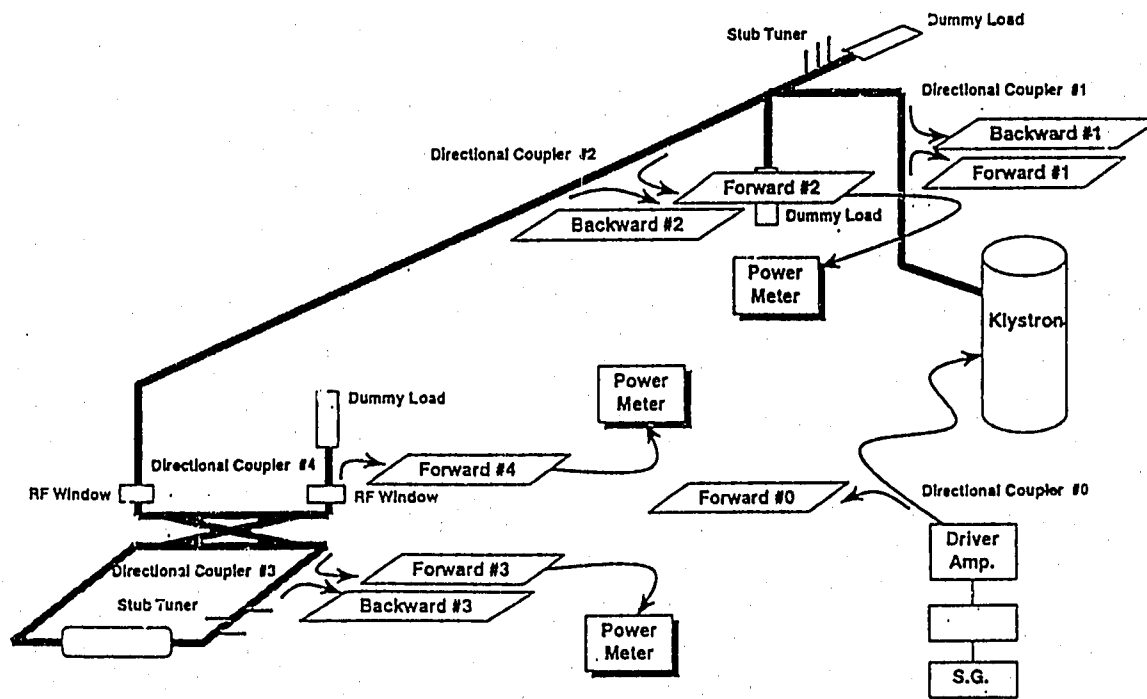
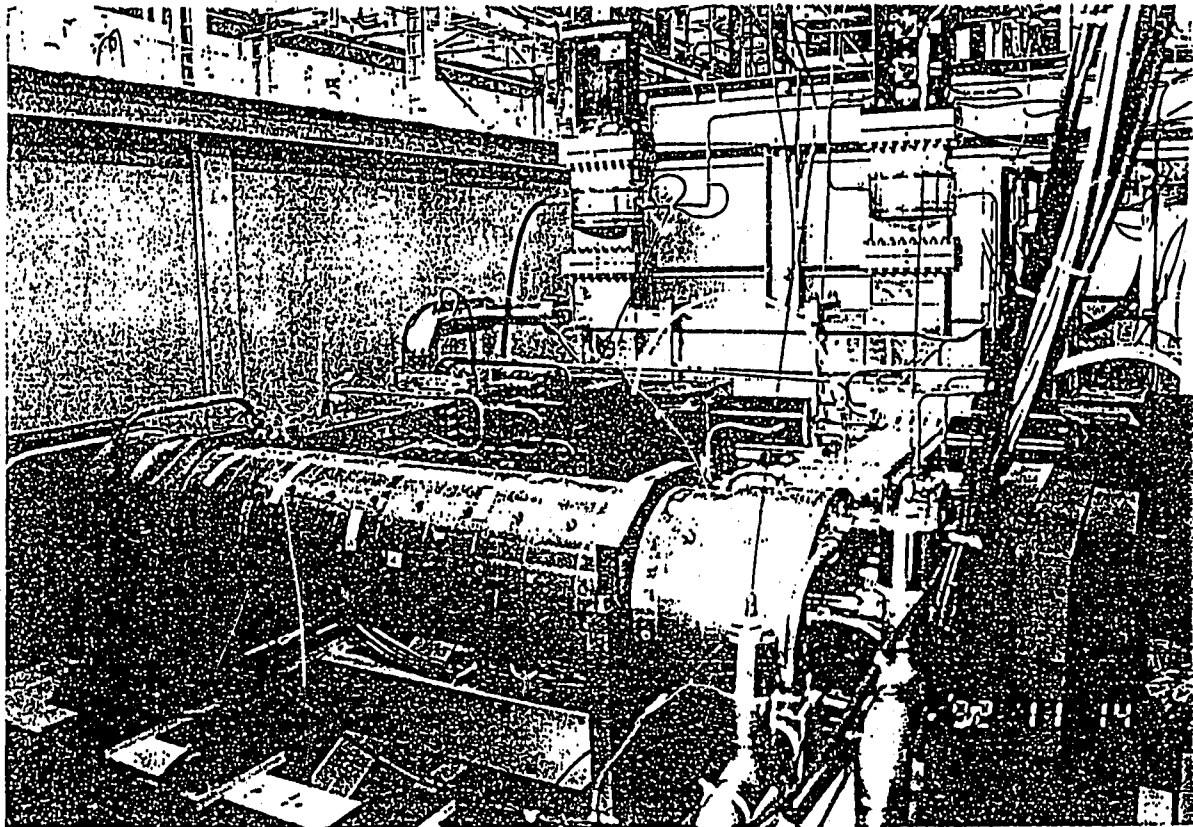
還流型加速管

- ・従来の加速管：電磁気設計に基づく数10ミクロンの超精密機械加工と運転時の精密温度制御 ($\pm 1^\circ\text{C}$)
- ・本開発の加速管：新たに大量な発熱に対処するため熱設計が必要、但し寸法精度への要求はこれまで通りの超高精度

設計目標

平均電力で200kW
最大電力で1MW





Schematic of RF detectors

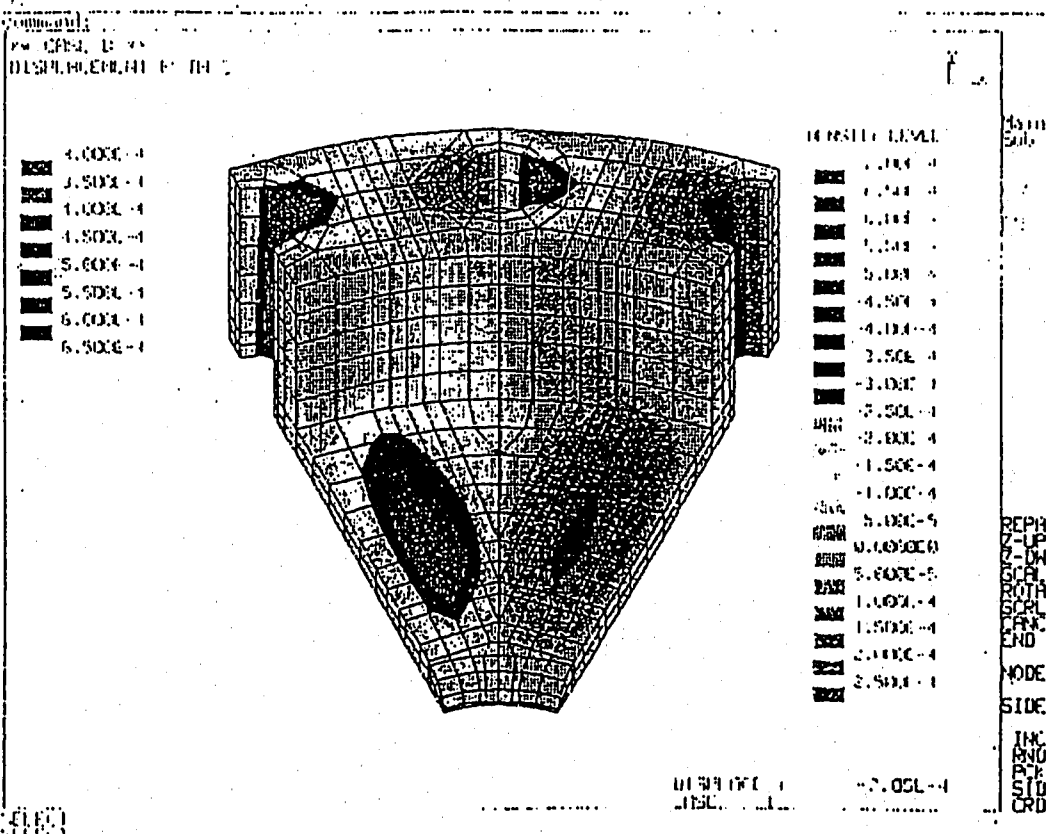
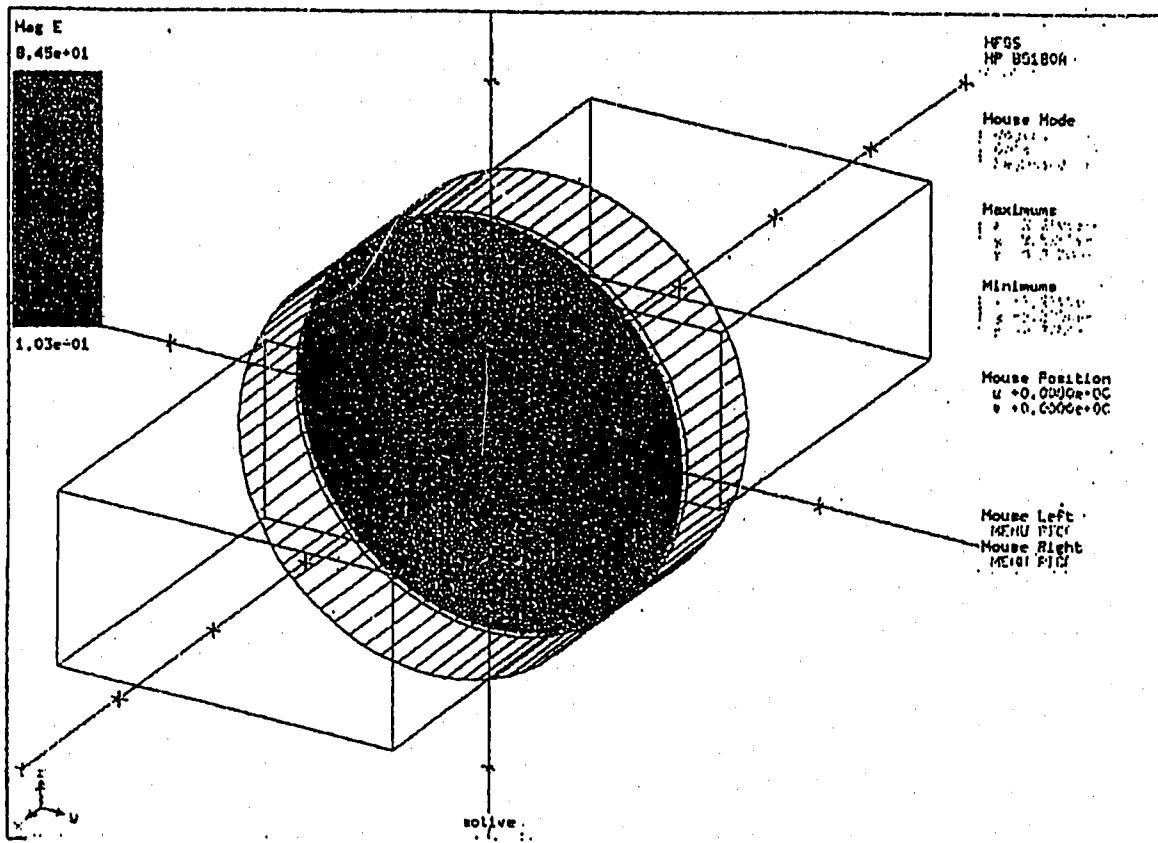
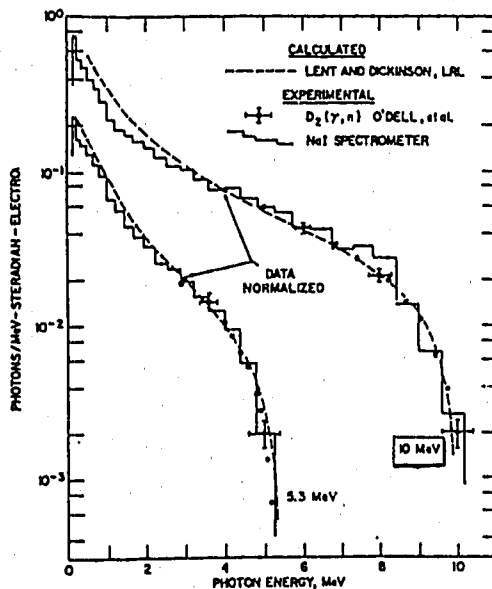
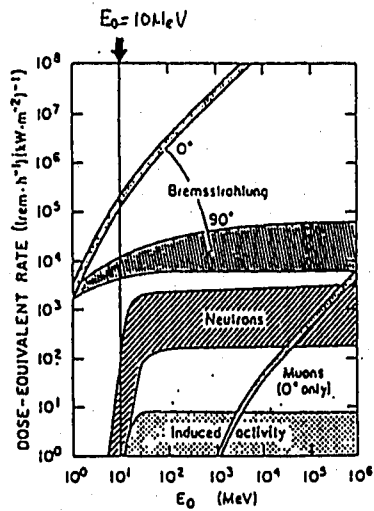
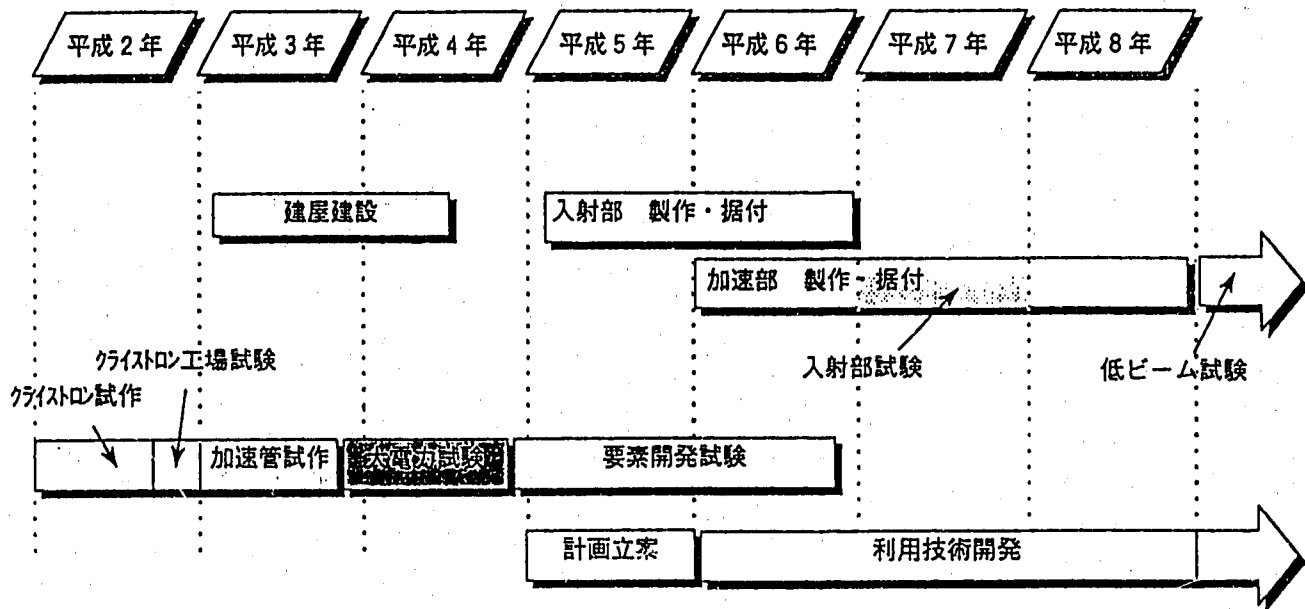


図. 2.245 CASE B 円周方向変位コンタ図

今後の開発スケジュール



ガンマ線発生量とそのスペクトラム

3. 中間報告内容説明

1. 応用技術検討

自由電子レーザー: PNC電子線形加速器による遠赤外光の発生

大強度陽電子源: 陽電子源の強度が弱いため未開発の応用分野

2. 照射利用検討

制動X線等の理工学的応用、X線源、中性子の利用

3. 計測技術検討

大線量場の放射線計測技術の開発、計測器校正場としての利用、断面積測定

1. 応用技術

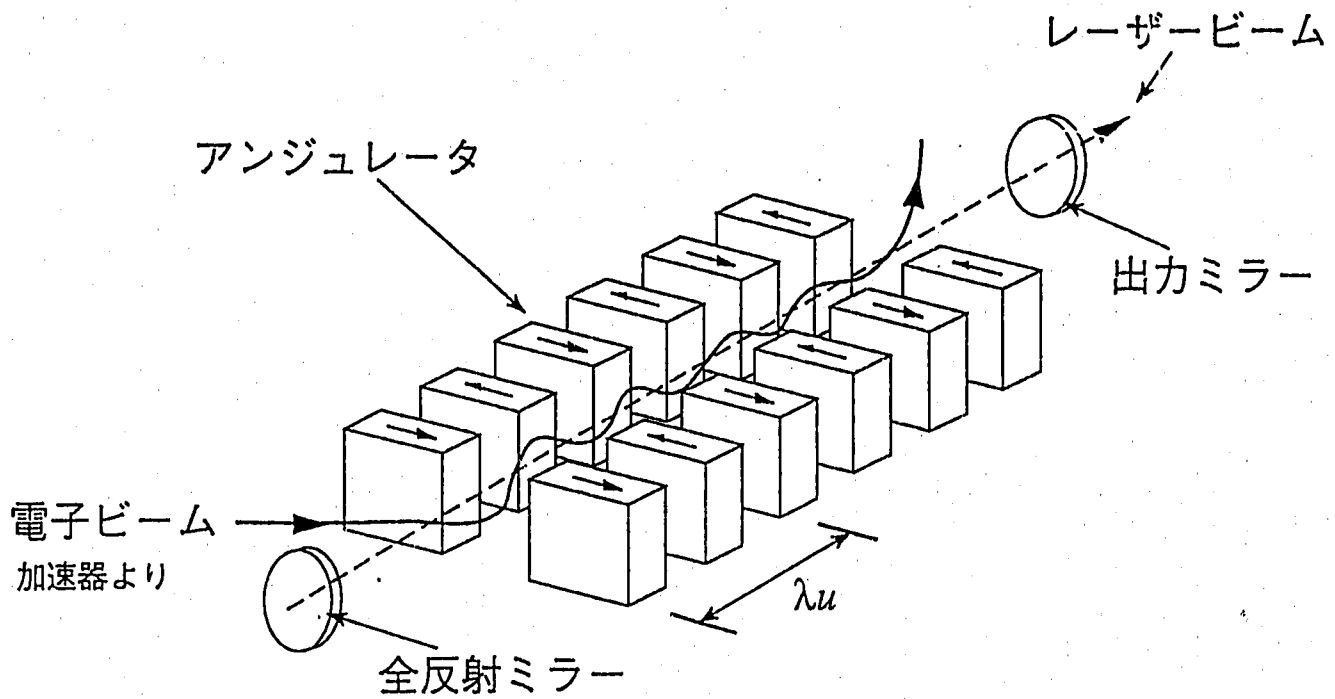
Apps-8

1) 自由電子レーザー

- ・ウラン濃縮 (同位体分離)
- ・遠赤外分光

2) 大強度陽電子源

- ・低速陽電子回折を用いた表面物性研究
- ・超ウラン元素の光核反応断面積の測定



自由電子レーザーの原理

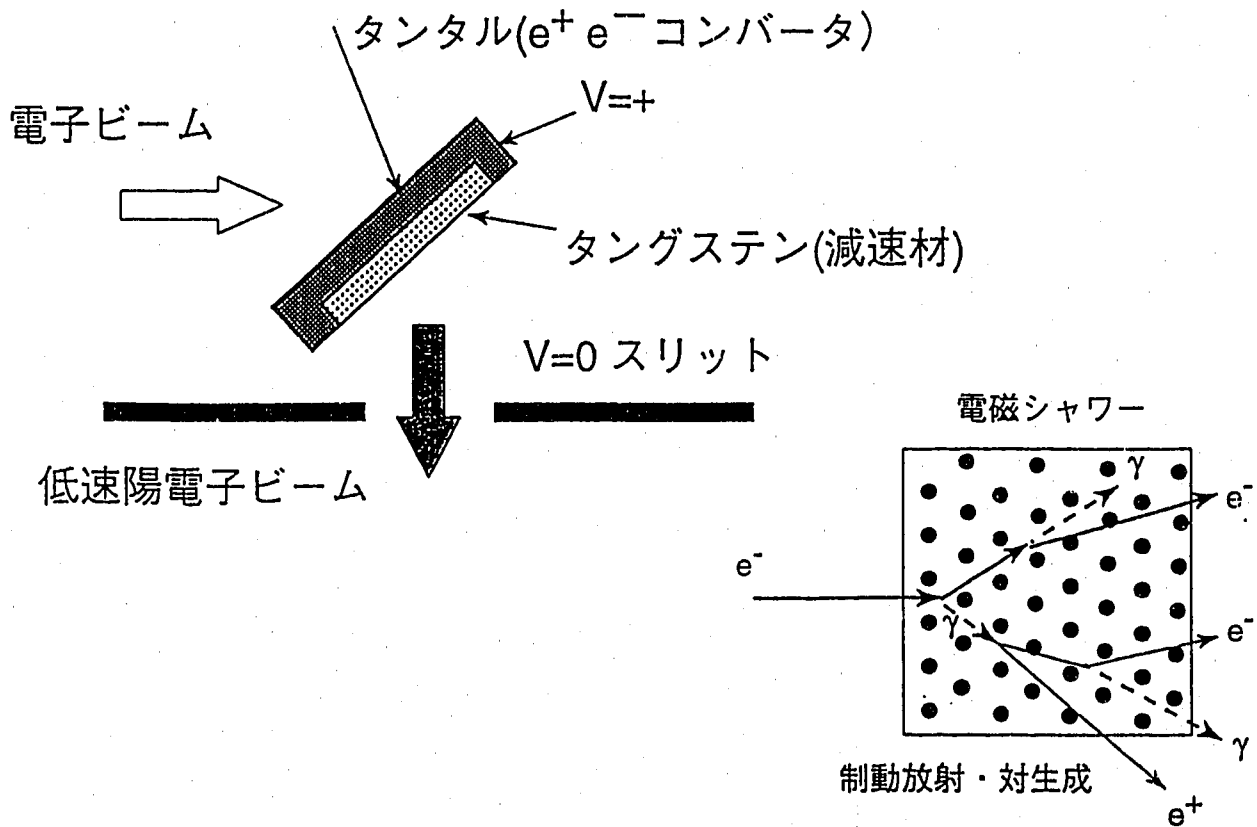
Apps-10

自由電子レーザー開発の状況

研究機関	発振波長(μm)	発振年	特記事項
スタンフォード大	3.5	1977	世界初
カルフォルニア大	200~800	1985	ユーザに提供
ボーイング	0.5	1987	現在最大出力 (1GW)
VEPP3. (露)	0.25~0.65	1988	現在最短波長
デューク大	0.01~0.5	建設中	同位体分離
阪大	1000	1988	
電総研	0.585	1991	
分子研	0.488	テスト中	
原研	10~50	建設中	完成予定 H8年
FEL研	0.35~20	設計中	
動燃	100	—	—

動燃及び原研で期待される 自由電子レーザーの比較

項 目	動 燃	原 研
波長 (μm)	100	10~50
立上り時間 (μs)	6	100
平均出力 (W)	1000	10



陽電子源の原理

2. 照射利用検討

1) 制動X線等の理工学的応用

X線・電子線を利用した材料開発

2) “X線源”としての応用

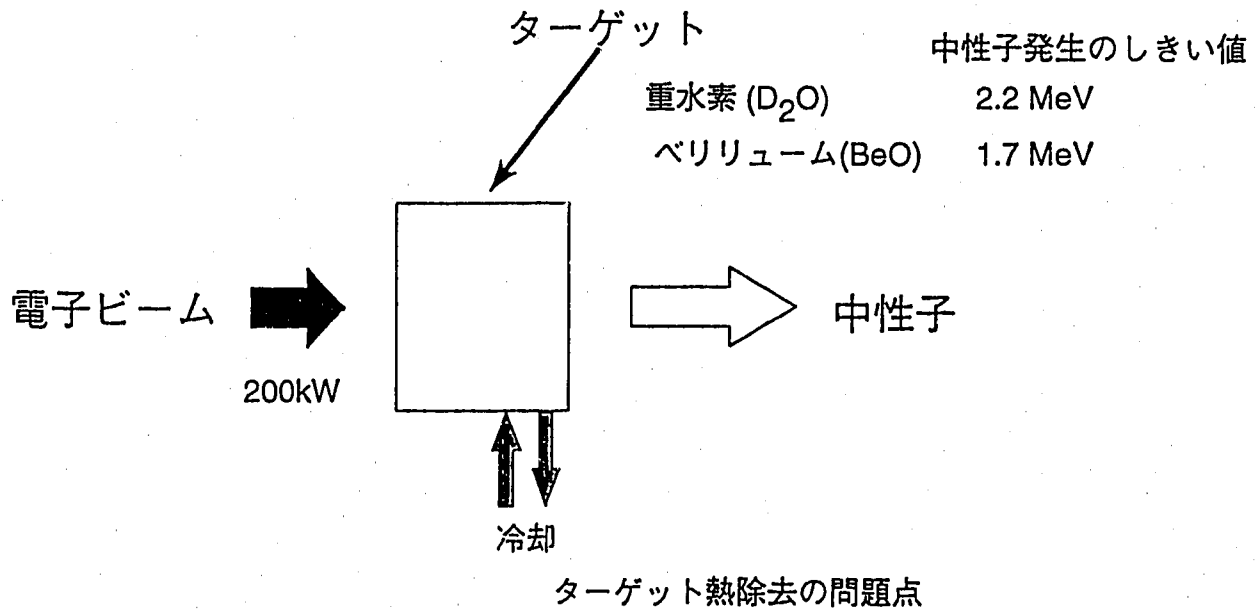
高エネルギーX・ γ 線標準場

3) 中性子の利用

電子加速器を用いた大強度中性子発生装置

⇒ ターゲットにD又はBeを使用

⇒ $10^{14} \sim 10^{15}$ n/sec



大強度中性子発生装置

3. 計測技術検討

「加速器の放射線計測」、及び「加速器を利用した計測手法」
について検討

1) 大線量場の放射線計測技術の開発

制動 X 線及び中性子線の混在場
パルスドシメトリ

2) 計測器校正場としての利用

中性子及び X・ γ 線の放射線モニタ、
検出器の実校正場として利用

3) 断面積測定

光核反応 ((γ, n) , (γ, f) 等) 断面積の測定

1) 大線量場の計測技術

(1) 制動 X 線

$\sim 10^5 \text{ Gy/h}$ \Rightarrow 積分型検出器が多い (化学、ガラス等)
 \Rightarrow 微分型検出器の開発利用 \Rightarrow 加速器・原子力技術への応用

(a). 放射線トリガ型レーザー

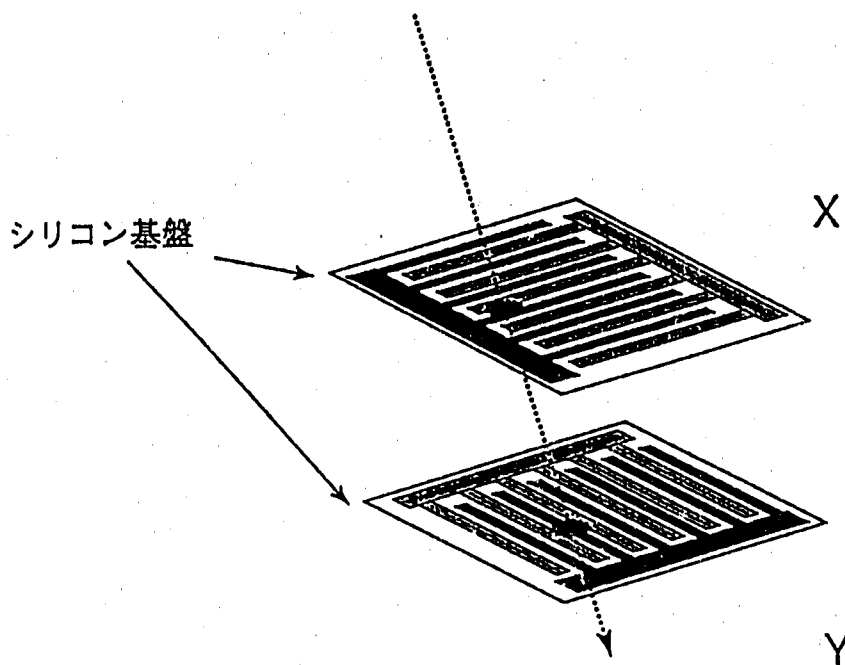
放射線によるレーザー発振電圧の変動を利用

(b). シンチレーション光ファイバー

放射線の空間分布測定器 (ホドスコープ) として期待

(c). マイクロストリップ検出器

LSIを用いた放射線検出器 \Rightarrow SSCの荷電粒子の位置・
時間分析用に現在開発が進められている



マイクロストリップ検出器

(2) 中性子

(a). 放射線トリガ型レーザー

^3He -Ne レーザー \rightarrow ^3He の(n,p)反応を利用

(b). 流体放射化システム

国際熱核融合実験炉ITERの中性子プロファイル
モニタとして検討

2) 計測器校正場

高エネルギー・大線量場での放射線測定機器の校正

3) 断面積測定

4. まとめ

可能性のあるテーマ

1. 自由電子レーザー

大強度CW加速器研究会での検討
クロスオーバー研究(原子力用レーザー)

2. PNCにおける照射施設として

電子線、ガンマ線、中性子の強力照射源
施設の公開利用(大学、研究所)

3. 大強度放射線場の測定技術

動燃における開発