

JAERI-Research
97-041



JP9707012



新しい蓄積リング用入射装置の概念検討

1997年6月

鈴木康夫*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷(株)

新しい蓄積リング用入射装置の概念検討

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター

鈴木 康夫*

(1997年5月13日受理)

蓄積リングに入射するための新しい入射方法を提案した。この入射装置はニュートライザーとアイオナイザーから構成される。前者はリング外部のビーム・トランスポート部に置かれ、収束用電磁石とウイグラーからなり、 H^- を H^0 に中性化するものである。後者はリング内の直線部に設置され、ウイグラーと光共振器からなり、ウイグラー磁場と入射粒子の相対論的速度によるローレンツ力を利用して、光子ビームとの散乱によりイオン化するものである。従来の装置のように、バンプ電磁石などによるリング内のビーム軌道を変えたり、フォイルによる散乱もない。本概念にもとづく最適化は、陽子蓄積リング入射装置部でのビーム・ロスの低放射化に役立つものである。

現在開発されている蓄積リングでは、この入射部での低放射化対策がもっとも技術的課題である。

A Conceptual Study of an Injector System for a Proton Ring Accumulator

Yasuo SUZUKI *

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

(Received May 13, 1997)

A new injection method for a proton accumulators is proposed. This injection system is composed of a neutralizer and an ionizer. The former is composed of focusing magnets and wiggler ones, which are placed at the beam transport line outside of the accumulator ring. This is useful to charge-change H^- beam into H^0 beam. The latter is composed of wiggler magnets and an optical resonator which are placed along the linear part in the accumulator ring. This can ionize H^0 beam into H^+ beam by the scattering between photon beam and H^0 beam under the Lorentz force generated by the interaction of the relativistic velocity of H^0 and the wiggler magnetic field. As there are not any effect on the proton beam trajectory by the bump magnets in this device nor the beam scattering by the foil as usual way, optimal design according to this method will be useful to reduce the beam loss at the injector part of the proton accumulator ring. In the intense proton accumulator ring currently developed, the reduction countermeasures of radioactive productions are one of the most technical problems.

Keywords: Proton Accelerator Ring, Injector, Intense Neutron Source

※ Science visitor

目 次

1. はじめに	1
2. 入射装置	2
2.1 ニュートライザー	2
2.2 アイオナイザー	4
3. 討 論	7
4. まとめ	8
謝 辞	8
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. An Injection System	2
2.1 Neutralizer	2
2.2 Ionizer	4
3. Discussion	7
4. Conclusion	8
Acknowledgements	8
Reference	9

1. はじめに

21世紀の新しい科学技術推進の研究手段として、次世代強力中性子源の開発が注目されている。米国では、NSNSが、欧州ではESSが5MWクラスの大出力陽子加速器によってその実現を図ろうとしている。原研の中性子科学研究計画¹⁾では、大強度超伝導線形陽子加速器を基幹施設とし、1.5GeV、8MWの陽子ビームを利用する多目的の研究施設を作ろうと提案している。そして、その主要研究テーマの一つである中性子散乱研究には大強度パルス中性子発生(5MW相当)のために蓄積リングが必要である。これらの加速器や蓄積リングは、従来にない大出力の陽子ビームを発生させることから、これを安定にしかも安全に運転できるようにするために、加速器そのものは勿論その周辺施設のビーム漏れ対策及び低放射化対策が極めて重要な技術課題となり、その低放射化対策の成否が、その開発の成果および運転・保守の難易さを決定づける大きい要因となると認識されている。

この蓄積リングの入射装置とは、超伝導線形加速器から、1.5GeV ($\beta = 0.92$)、ピーク30mAの H^- ビームを3.6ms間受けて、それをリング内に入れて貯め込み、0.5 μ s程度のビームに圧縮した後、そのビームを50Hz、ピーク100Aのパルスとして中性子源となるターゲットに送り出すものである。

リングへの入射には、陽子ビームの軌道を変える電磁石類や荷電変換用フォイルを利用するのが一般的である。しかし、本計画のような超伝導線形加速器の有利さを発揮させるには、常電導加速器と比較して長くパルス幅を広げつつ、ピーク電流を低く抑え、空間電荷による悪影響を少なくするのが得策である。そのため、ビームをリングに十分に貯めるには、3.6ms程度、数千パルスのマルチターン入射を行う必要がある。

この場合には、フォイルが入射される粒子自身による長時間照射を受けることはもちろん、先に入射され、リングを周回する陽子ビームがフォイルに再衝突することなどから損傷を受けてフォイルの健全性を保つことが難しいばかりでなく、さらに陽子ビームの軌道の変化・散乱により、周囲の機器が放射化される可能性が大きいことが指摘されている。従って、これらの欠点を克服する何らかの新しい

い方法の開発を真剣に検討することが緊急に必要となる。

そこで、リングの機器の中で放射化対策がもっとも困難とされるビーム入射装置について、従来採用されていない方式、つまりフォイルを用いない方法でしかも低放射化が可能とする方法をここでは検討することとする。

ここで述べるリング入射装置では、設計条件としてビーム・ロスが 10^{-5} 程度になることを条件に最適な方法をを探索することとする。以下、第2章では入射装置の概念設計を行い、第3章それを評価し討論を行い、第4章でまとめることとする。

2. 入射装置

この装置では、リングに入れる前に H^- ビームを収束させつつ中性化するニュートライザーとリングの直線部に置かれた H^0 ビームをイオン化するアイオナイザーから構成される。両者の強い磁場はウイグラー電磁石を用いて磁場による軌道変化の影響を最小限にする。入射のためのバンプ電磁石などリング内の粒子軌道を変えるものはいっさい使わず、しかも荷電変換のためのフォイルも使わない。

ニュートライザーでは、大強度陽子線形加速器からの H^- イオンをその相対論的速度と磁場との相互作用によって生ずるローレンツ力により中性化してリング軌道内に入れる。アイオナイザーでは、さらにその H^0 ビームに周期的で強い磁場中を通し、ビームにローレンツ力をかけつつ光子との衝突させる。これにより H^0 ビームをイオン化してリングの軌道に乗せる方法をとる。つまり、この入射のためには、 H^- の中性化($H^- \rightarrow H^0$)とイオン化($H^0 \rightarrow H^+$)の二つのプロセスを必要とする。しかも、 H^- ビームを大きく散乱させることなくリングに入れることまた、先に入り周回するイオンに悪影響を与えない方法を検討する。

2. 1 ニュートライザー

まず、 H^- イオンを中性化してリング内に導入する方法を議論する。光速に近い速度で走る H^- をそれに直交する磁場中を通すと $E = V \times B$ のローレンツ電場が生ずる。この電場が H^- が捕らえている電子の電場を乱して自由電子とする。言い

換えると、 H^- を形作る外周の電子は、ローレンツ電場によってポテンシャルを下げられ、水素原子から離れることができる。第1図に H^- イオンから電子をストリップして中性化する飛程を、それに必要な磁場の関数として示す²⁾。これによる H^- ビームを1 Tのそれに直交する偏向磁場中を数センチ通すと、ローレンツ力： $e E = e \beta \gamma c B$ によって H^- ビームは殆ど中性化され、電子がストリップされずに残る確率を十万分の1程度に下げることができる。

したがって、第2図のように、まず、リングの外で H^- ビームを4重極電磁石に通し、ビームをアイオナイザー中央部に収束させる。その後、テーバード・ウイグラーを置き電子ストリッパーとして作用させる。これによりリング内に中性ビームを直進させ導入することができる。また、中性化する前に、4重極電磁石により適当な距離にビームを収束させることができるし、収束点でのビームの断面を楕円形にすることもできる。ここでは、後に述べるように、長軸3 cm、短軸1.5 cmの横長楕円形としよう。

電子ストリッパー用の電磁石では、 H^- ビームは中性化されるまでは力を受け、その磁場中の距離によって、 H^0 ビームの直進する方向が決まる。後述するようにその偏向幅を十分狭くするために考案したのがテーバード・ウイグラーで、これによりほぼ直進するとみてよい。もし、残留 H^- のイオンが残るならばその電荷を利用して磁石により曲げ、ビームダンプに導くようにすればよい。

ここで使うテーバード・ウイグラーの磁場は、 $1/4$ 周期5 cm (周期20 cm)で、中央部で1 T、両端部の半周期では、強度ピークが $1/2$ になるものを考える。この磁場に入ってきた H^- ビームは周期的に振動する力を受けることになる：

$$m \cdot \gamma \frac{d v_x}{d t} = e v_z x B_y$$

から、

$$\frac{v_x}{v_z} = \int \frac{e B_y d z}{m \cdot \gamma v_z}$$

ここで、 v_x は磁場によって生ずる速度変化分であり、積分領域はウイグラー磁場の先端から中性化される所までとする。この積分値は第3図のようになり、放射光施設や自由電子レーザー開発で用いられる計算法を利用することができる。詳しくは次節で述べることにして、偏向角は両端部で磁場強度が $1/2$ であること

を考慮して、最大 2.0 mrad であり、最も中性化される確率の高い最大磁場の所（中央部）では 0 となる。その最大偏向角の $1/4$ まで許されるとして 0.5 mrad 、 10 m で 5 mm の偏向角となり小さい。最大偏向角の $1/4$ とは、最大磁場部前後 0.8 cm 以内で中性化したものに相当する。これは厳しい条件であり何らかの最適化の必要性を示唆する。ただし、中性化された後は、リングの偏向電磁石の影響を受けずに直進することになる。

2. 2 アイオナイザー

中性ビームは慣性により直進し、リング内に入る。そこでのイオン化するための手段として、本稿ではウイグラー磁場中での光子との衝突をもちいることを提案する。リングの直線部に設置されたウイグラー型磁場に突入する場合を考えよう。ウイグラー型磁場を採用する理由は、強い磁場を用いてもすでに周回するイオンの軌道にはその影響を少なく出来るからである。

・ウイグラー

ここでは仮にウイグラー型磁場として第 4 図のように 5 個の超伝導電磁石（コイル内径 5 cm ）を 7 対用いた周期長 20 cm 、最大磁場 5 T のものを考える。両端の磁場強度は半分としイオンの軌道に影響しないようにしている。この程度の超伝導電磁石は、KEK フォトン・ファクトリーのウイグラーとして実用化されている技術である。

そのウイグラー磁場の性質は特性パラメーター K 値を用いると便利である。放射光施設のウイグラー研究の際によく用いられる K 値は、次のように計算される。電子の場合はその運動方程式から； $K = e B \lambda / 2 \pi m_0 c = 93.4 B \lambda$ であるから、今回の場合は、質量を陽子のそれに替えて $K = e B \lambda / 2 \pi m_0 c \beta = 0.05 B \lambda / \beta$ となる。

この K 値を利用すると前節の積分は $(K / \gamma) \sin 2 \pi z / \lambda$ となることから、イオン化された所によって偏向角はきまることになる。そして H^+ ビームの最大偏向角は $\psi = K / \gamma$ であることから、次のように見積もることができる。すなわち、ここで、 $B = 5 \text{ T}$ 、 $\lambda = 0.2 \text{ m}$ 、 $\beta = 0.92$ を入れると $K = 0.055$ となり、 $\psi = K / \gamma = 20 \text{ mrad}$ となる。実際には、両端で磁場強度が $1 /$

2 になっていること、イオン化される最大磁場のところが偏向角 0 であることから許される偏向角は最大偏向角の $1/4$ として 5 mrad の周辺であろう。これは、ウイグラーから 1 m のところに収束用電磁石を置く必要があり、また、イオン化する場所の局所化の必要性を示唆する。

また、周回する陽子ビームの軌道に影響を与えないようにするには、ウイグラー全長にわたる積分 $\int B \cdot dz = 0$ であることが必要で、このため第 4 図のような磁場分布をつくる必要がある。

ここに入ってきた H^0 ビームの一部はローレンツ力だけによりイオン化されることもある。その確率は第 5 図に示す通りで、主量子数 n が 2 以上の励起原子は磁場の最大値の部分を通過している時間 ($t = 5 \times 5 \text{ cm} / v \sim 0.906 \text{ ns}$) に 100% イオン化される³⁾。しかし、殆どは基底状態の原子 H^0 であり、それをイオン化するには磁場強度が足らず、そのまま残る。そこでウイグラー磁場に通過中になんらかの方法で $n = 2$ 以上に励起しなくてはならない。

・光励起法

つまり、光子との衝突により基底状態の H^0 を $n = 2$ 以上に励起できれば、ウイグラー磁場のローレンツ力により原子ポテンシャルの歪んだ H^0 はイオン化されることになる。 n を H^0 の密度、 n_0 を光子密度とし、 σ としては H^0 に乗った系の数値をとるとして 1.5 GeV ($\beta = 0.92$) の H^0 に乗った系から見れば、

$$\frac{dn}{dt'} = -n\sigma\beta cn_0$$

である。これを解いてから、実験室系にもどして考えれば $t' = t/\gamma$ とおいて

$$n = n_0 \exp(-t/\gamma\tau), \quad \tau = 1/\sigma\beta cn_0$$

が得られる。

ここで、 $n/n_0 = 10^{-5}$ 、 $t = 0.906 \text{ ns}$ (五つの磁場強度最大のところを通過する時間の和)、 $\gamma = 2.60$ とすれば、必要条件として $\tau = 30.3 \text{ ps}$ が得られ、 $n_0\sigma \sim 1.2 \text{ cm}^{-1}$ が得られる。

もし、イオン化されれば、 H^+ となり、直線部を通り抜け偏向電磁石等の磁場の影響を受けて軌道が変わり、リング軌道に入ることになる。

基底状態にある H^0 を 2 p レベルに励起する光の吸収断面積はよく知られているように 121.6 nm の光で、 $\sigma \sim 1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ である⁴⁾。ビームに乗った系で第 6 図のようにレーザー光を H^0 正面から衝突させることを考えると、ドップラー効果により、 H^0 を励起させるに必要な光の周波数は次のようになる； $\omega' = \omega \gamma (1 - \beta \cos \theta)$ において $\cos \theta = -1$ とおいて計算すると、実に可視光領域 607.7 nm のレーザー光でよく極めて作りやすいレーザーとなる。この領域のレーザー光は簡単に見つけることができ、また、共鳴イオン化ではありながらスペクトル幅も広くて良い。ここでは 600 nm としよう。

600 nm の光子は $\nu = 5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ に相当することになるから $h\nu = 3.31 \times 10^{-19} \text{ J}$ となる。この光の 1 MW, 3.6 ms のパルスはビーム断面積を 1.7 cm^2 (理由は後記) として $n \sim 0.59 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ となる。 $n\sigma \sim 1.2 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\sigma \sim 1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ であるから必要な光子密度は $n \sim 1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ となり 205 kW あれば必要条件を十分に満たすことになる。このレーザーを製作するのは、長パルス (3.6 ms, 50 Hz) であるため、一般に使われている工業用レーザーが 10 kW 程度とを考えると難しいと思われるので、さらに効率を上げるための工夫が必要となる。

・光共振器

そこで、少ない出力で光子密度を上げるため、レーザー技術で用いる光共振器を利用する。レーザービームの径をある程度太くするため光共振器は凹面鏡と凸面鏡の組み合わせで構成する。光共振器の設計法によれば⁵⁾、ミラーの曲率半径を、104 m (凸面鏡)、109 m (凹面鏡) で距離 6 m 離れた光共振器は安定であり、その中央部でのスポットサイズ (半径) は 7.35 mm, ミラー上で 7.2 mm, 7.5 mm となる。すなわち第 7 図のように半径 7.35 mm, つまり、断面積 1.7 cm^2 の光ビームを貯め込むことができる。この光共振器の回折損失はミラー径 38 mm として 10^{-4} 以下であり、その他の損失を考慮しても 205 倍に光子の密度に上げることが出来る。すなわち必要なレーザー出力は 1 kW で十分となる。これは現在の技術力から考えて十分実現可能なレーザーである。実際には、このレーザーはパルス幅の長いことから、半導体レーザーなどからのビームを非線形素子で増幅することになる。スペクトル幅も厳しい条件は要らな

い。

この光共振器を第8図のような真空チェンバーを作りウイグラー磁場に配置すれば、 H^0 ビームと相互作用させて、イオン化することは容易である。この傾きを決定させるためには第9図のように考えて、粒子ビームの通るためのクリアランスを半径20mmとってもミラーの半径は38mmとることができる。その傾きで交叉させると光の断面は第10図のようになり、ここに H^0 ビームが入射するように横長楕円形に収束させたのである。

なお、イオン化されない中性の原子は、第2図のように次のセクションの偏向電磁石の所で、ビームダンプへ分岐される。

3. 討論

本稿では極めて特徴のあるリング加速器への入射装置について検討した。ニュートライザーでは、 H^- ビームの状態のうちに収束をかけ、その後に中性化するテーパードウイグラーに入れる。ウイグラー磁場によるローレンツ力は電子ストリッパとして有効であるが、中性化された位置により若干の偏向を受ける。この面からウイグラー磁場の最適化が必要であるが、 0.2 mrad は10mで2mmであり小さい。また、リングの偏向電磁石の部分では、 H^0 のイオン化を避けるようにその強度を最適に設定する必要がある。また、アイオナイザー中央部に楕円状に収束させ、光子ビームの効率的利用を図った。

アイオナイザーでは、光共振器による光励起法によるイオン化を提案した。ウイグラー磁場の存在はイオン化するのに、基底状態の中性原子を一つ上のレベルに励起するだけでよく、レーザーへの負担を極めて軽減したと言える。1.5GeVのビームの特徴を最大限に利用し、ローレンツカの利用、ドップラー効果の応用などがそれに大きく貢献した。ウイグラー磁場や光子の利用などは周回イオンの散乱といった悪影響を大きく低減化し、極めて有望であることがわかった。

今後は、リングの軌道計算の中に本装置を組み入れ、ウイグラー磁場を挿入したときのエミタンスの増加、ビームの漏れ、ビーム不安定性などビームダイナミックスからの詳細な検討が必要となる。

しかしながら、この論文は、荷電変換の効率をあげることを第一としており、

放射化の最大要因である荷電変換時の偏向角を下げるための工夫がなされていない。今後は磁場分布の最適化、レーザー光の有効な利用法により、この面の最適化が図られるべきである。

4. まとめ

リング外に設置するニュートライザーとリング直線部に設置されるアイオナイザーの構成による新しい入射装置を提案した。これによるビーム損失は 10^{-5} と従来方式とは格段の低率である。ニュートライザーは収束用4重極電磁石等とウイグラー磁場の組み合わせにより、ビームに収束性を与えつつ、また、磁場による曲がりの影響を抑えつつ直進させ、アイオナイザーに導くことができる。

アイオナイザーはウイグラー磁場と光共振器による光子ビームによるイオン化システムである。光子ビームはドップラー効果を用いるため可視域のレーザーでよく、また、光共振器により必要とするレーザー出力も最低化することができる。ウイグラー磁場による電離効果によりレーザー光の効率化とともに、周回するイオンへの影響を最少にできることも本提案の特長である。しかし、荷電変換時の偏向角の低減化にはまだ最適化の余地があり、ウイグラーの磁場分布やレーザー光の使い方の最適化とともに、今後はさらにリング軌道の解析などを考慮した詳細な検討を行うことにより、もっと効率的な入射システムを開発できるであろう。

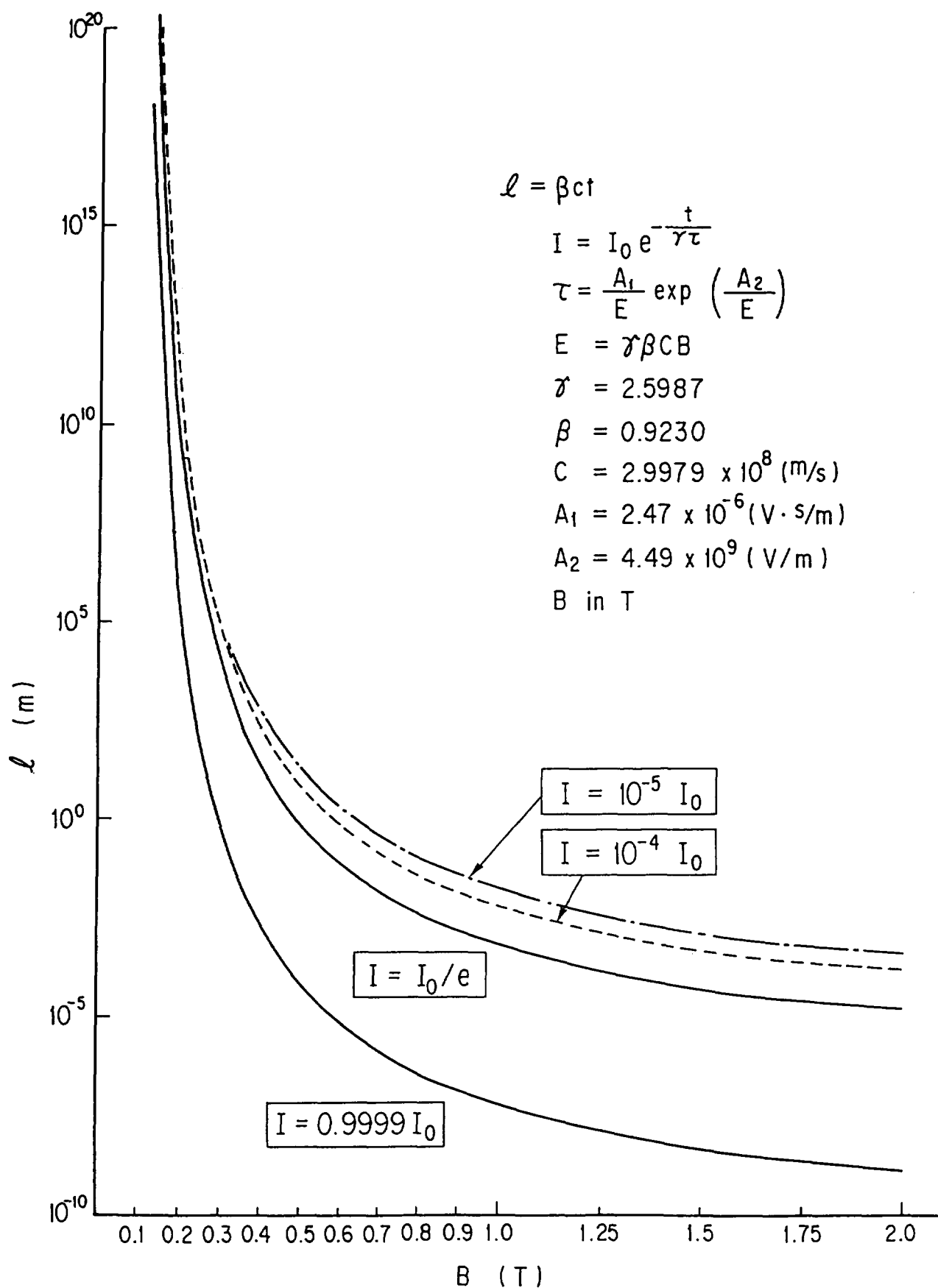
またさらに実験的R & Dも必要となろう。

謝辞

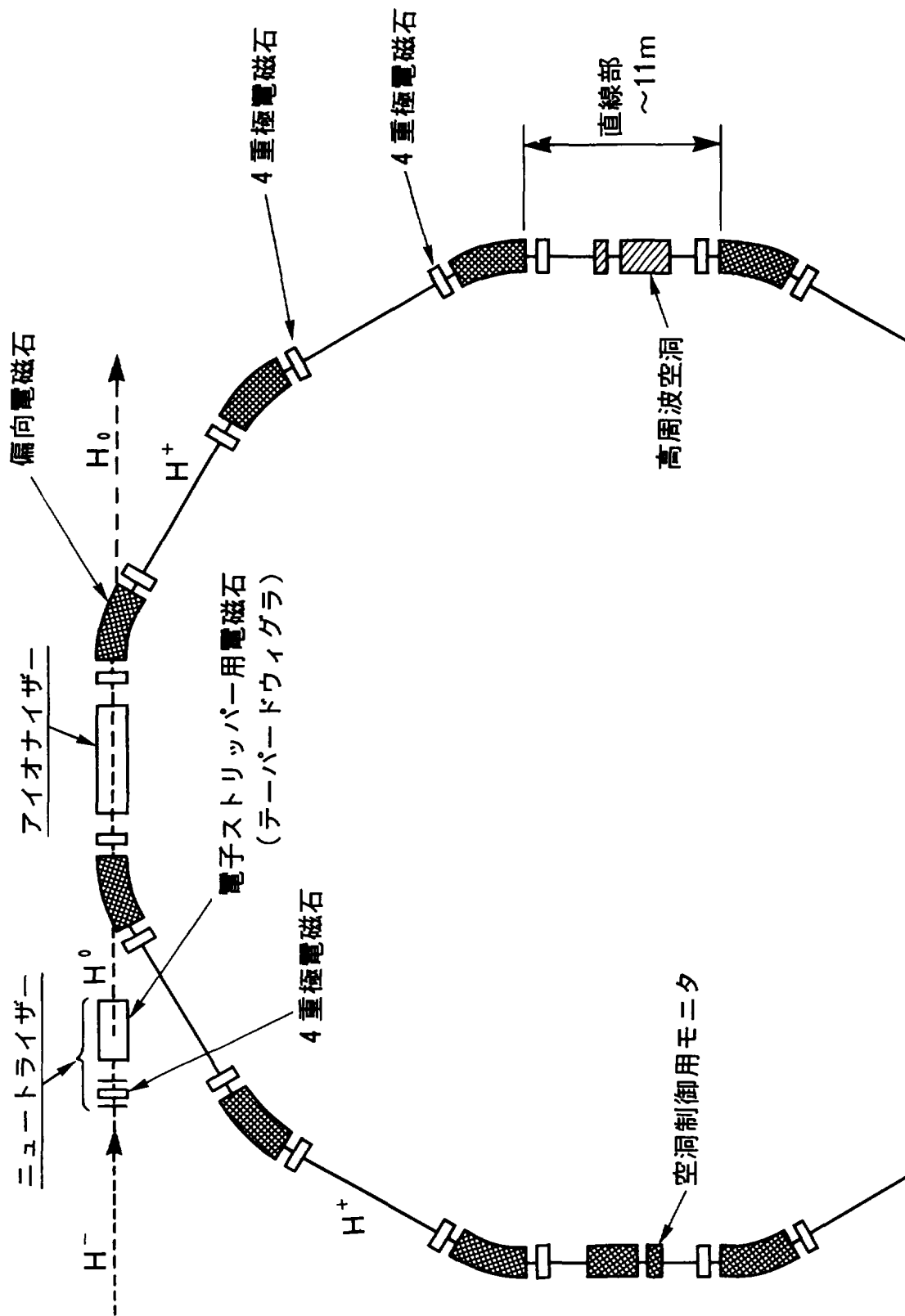
この検討の端緒はKEKの山根功教授と原研核データセンター白井稔三主任研究員との議論による。また、光共振器の設計には原研自由電子レーザー研究室の沢村勝、永井良治研究員の協力を得た。この機会に両者に深くお礼を申し上げる。

参考文献

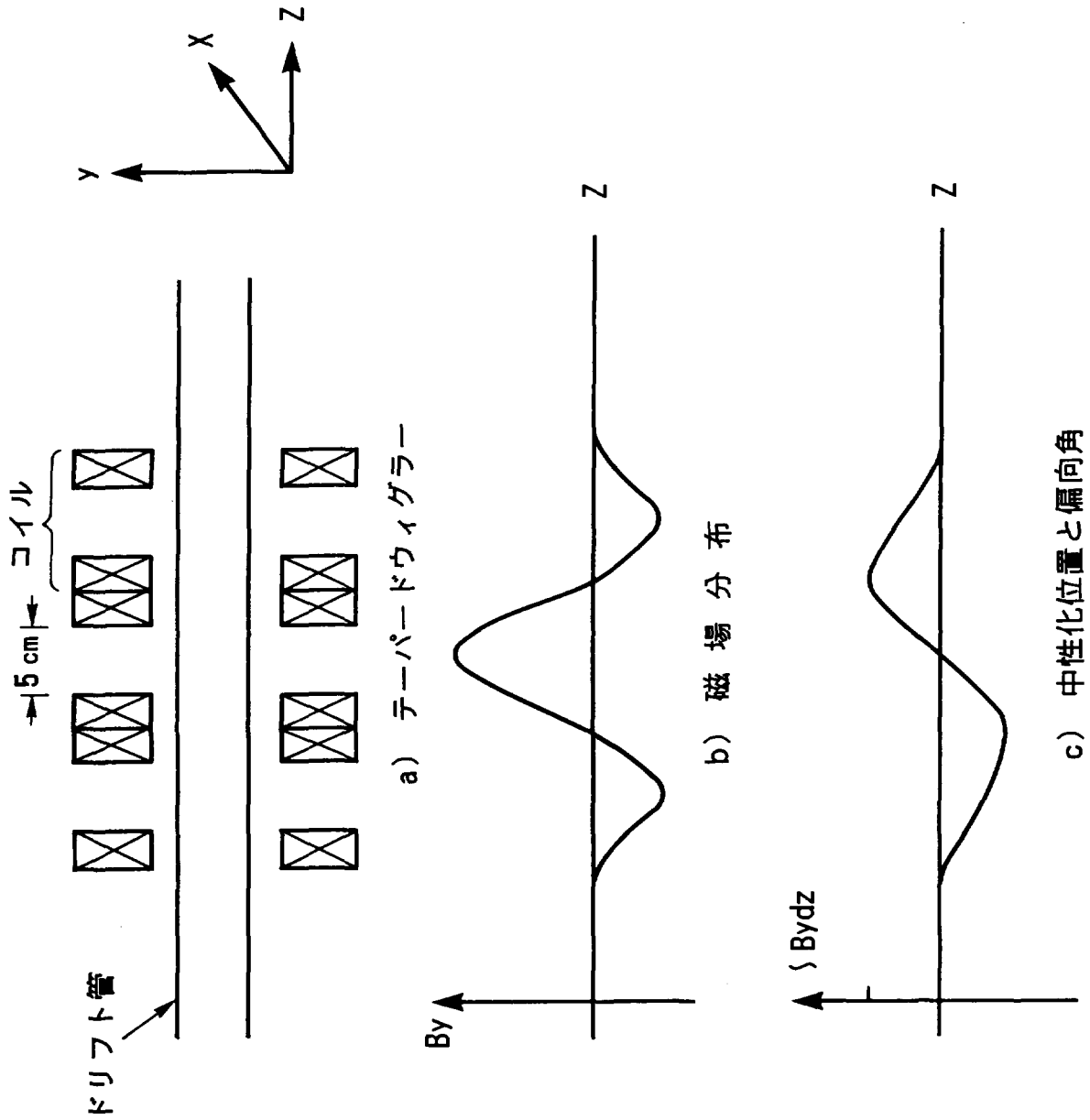
- 1) 中性子科学研究計画：原研パンフレット、(1996年10月)
- 2) 山根 功：中性子科学研究計画検討委員会加速器専門部会資料、(1997年1月)
- 3) 同上
- 4) 電気学会：放電ハンドブック(1974) p、19
- 5) 多田邦夫、神谷武志共訳：光エレクトロニクスの基礎、(1988年)、丸善、東京



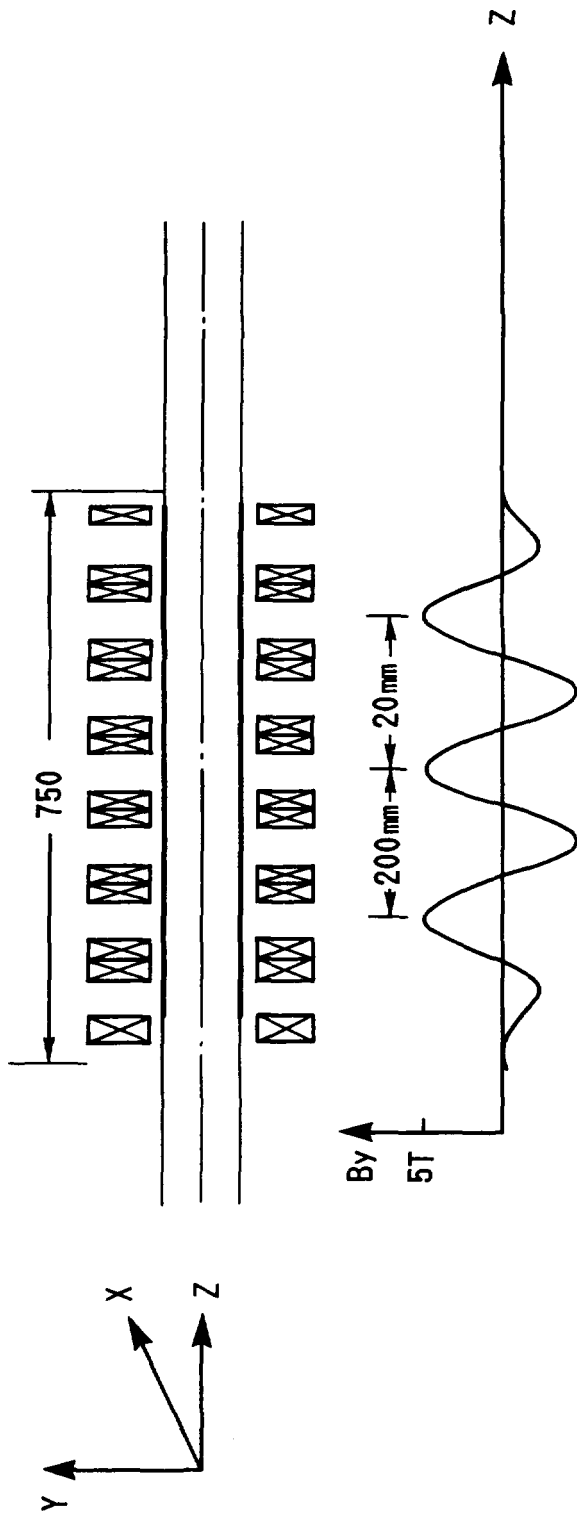
第1図 1.5 GeV H⁻イオンの磁場中の飛程



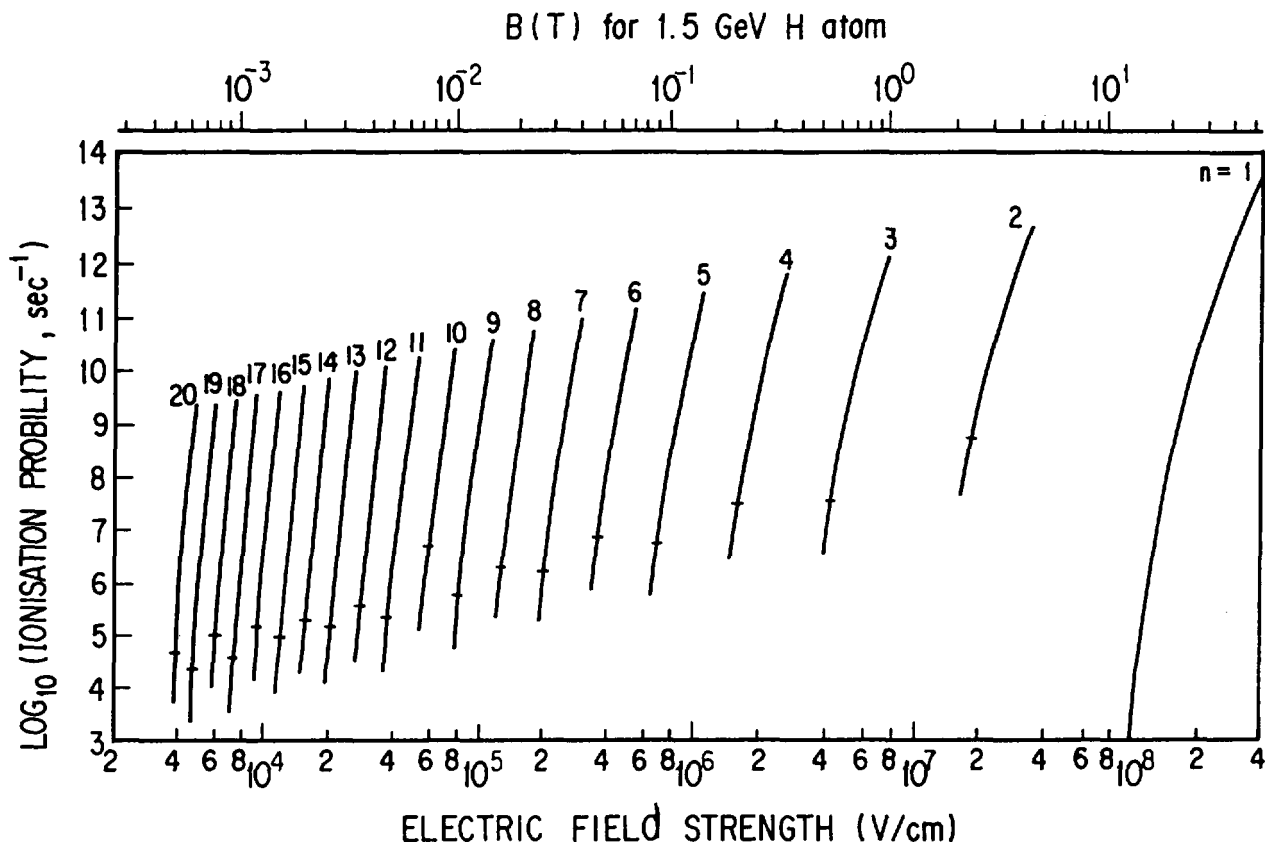
第2図 入射装置の配置図



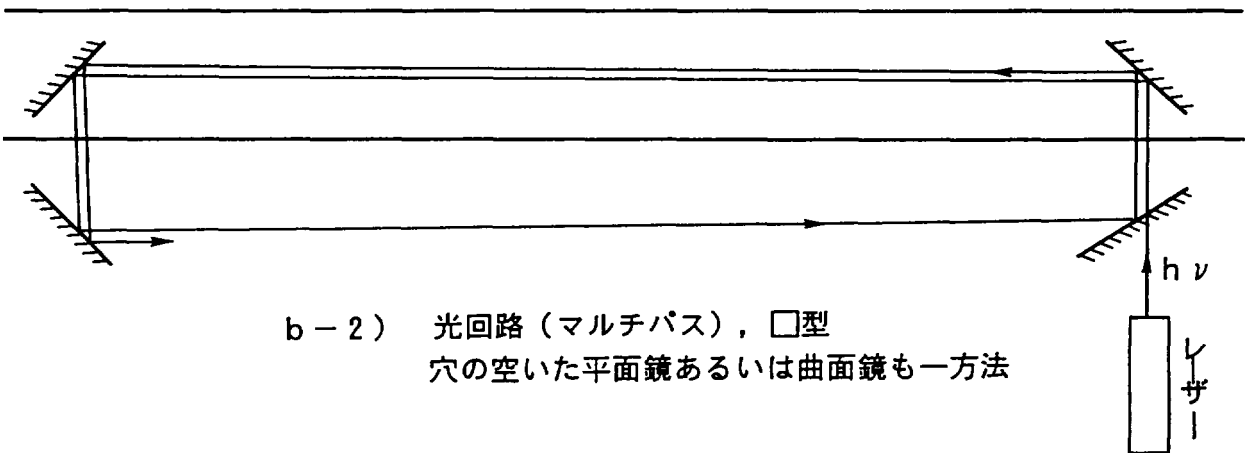
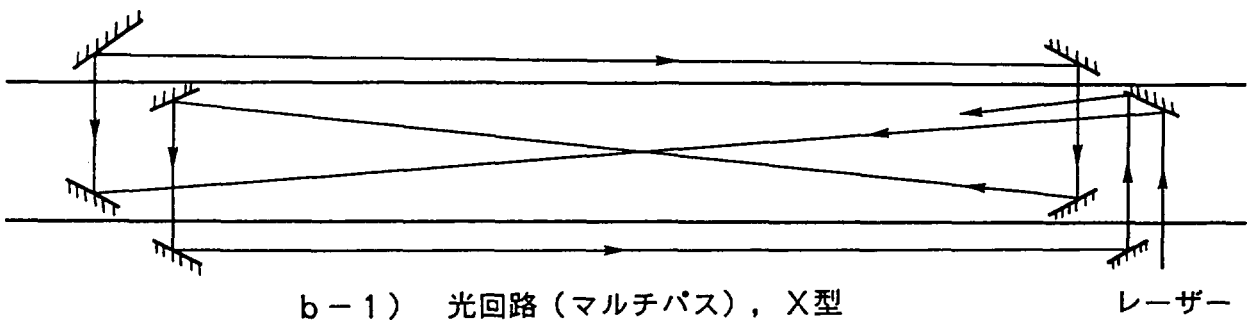
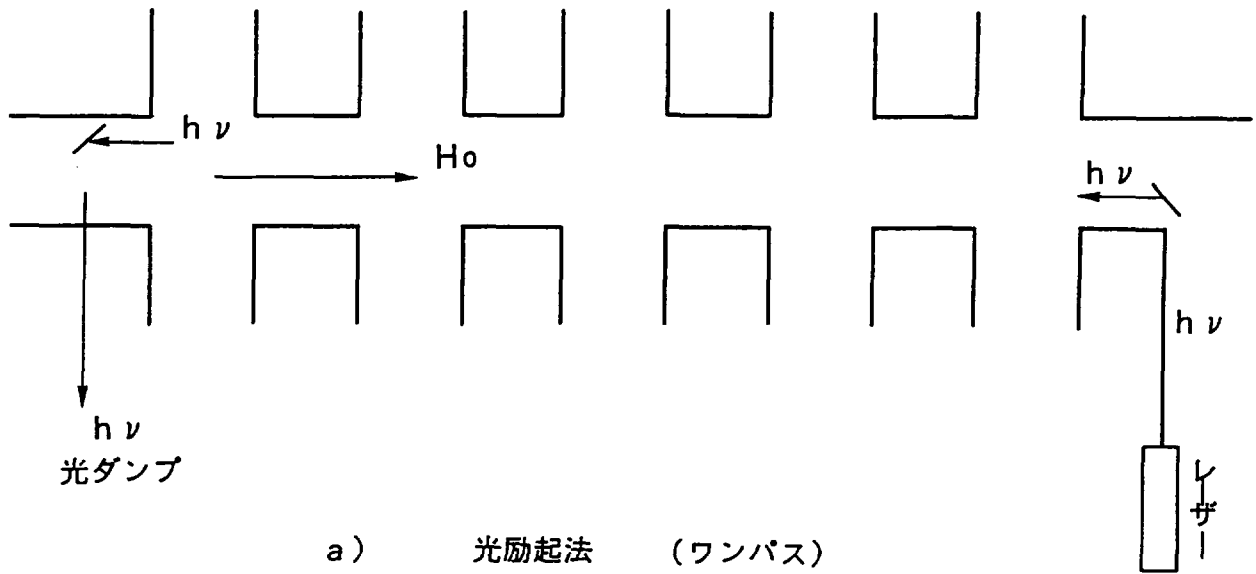
第3図 テーパード・ウイグララーとその磁場分布



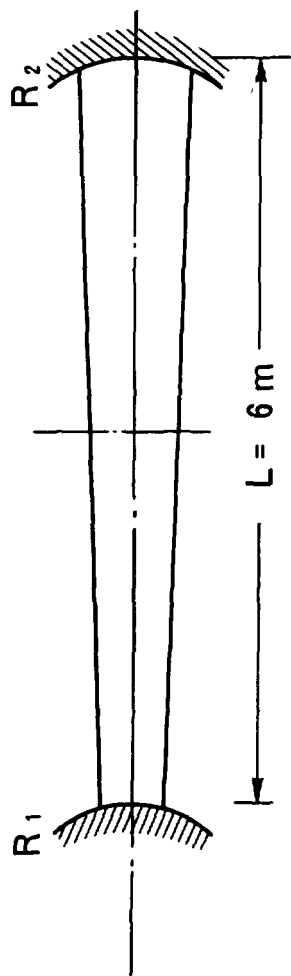
第4図 ウィグラー-電磁石とウィグラー磁場



第5図 電場強度とイオン化確率

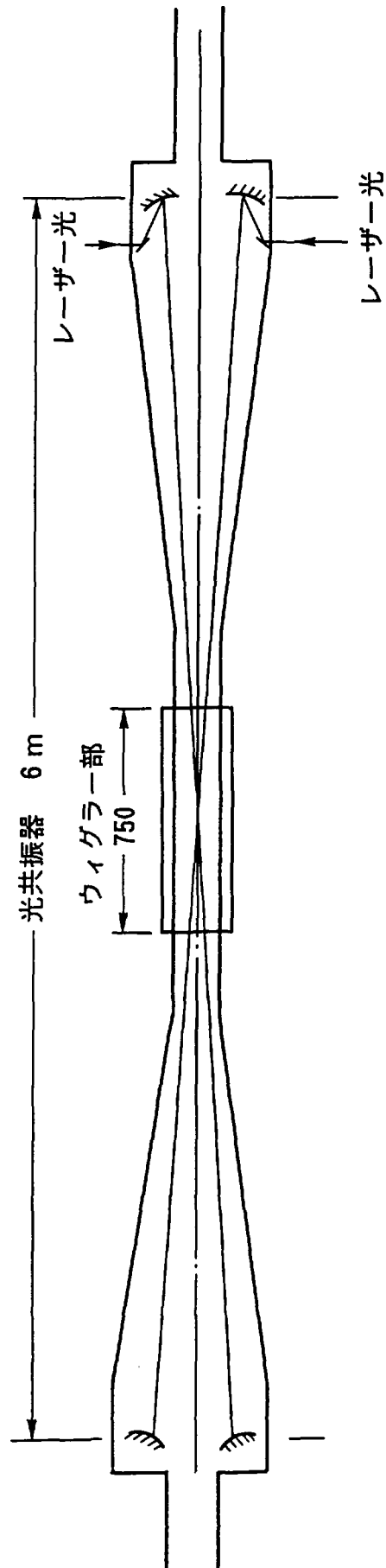


第 6 図 光励起イオン化法

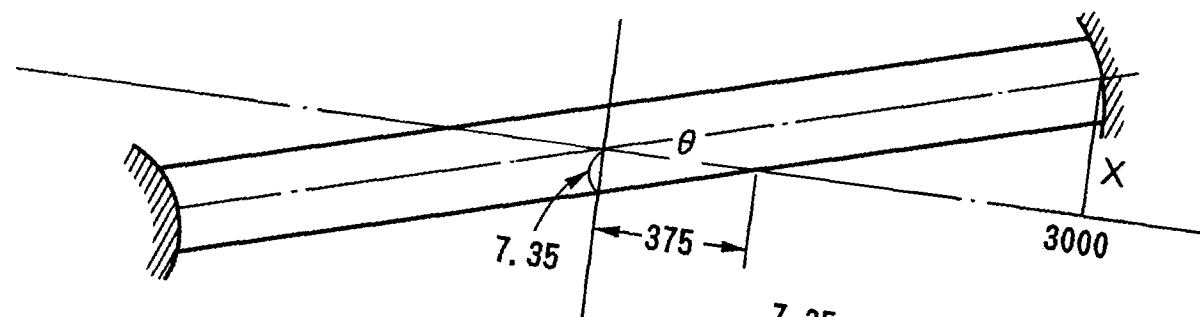


ミラーの曲率半径 : $R_1 = 104\text{m}$
 $R_2 = 109\text{m}$
中央スポットサイズ (半径) $= 7.35\text{mm}$
反射鏡上のスポットサイズ : $W_1 = 7.2\text{mm}$
(半径) $W_2 = 7.5\text{mm}$
反射鏡間距離 : $L = 6\text{m}$

第7図 凹面-凸面構成のファブリー・ペロー共振器



第8図 光共振器用真空チャンバー XZ面

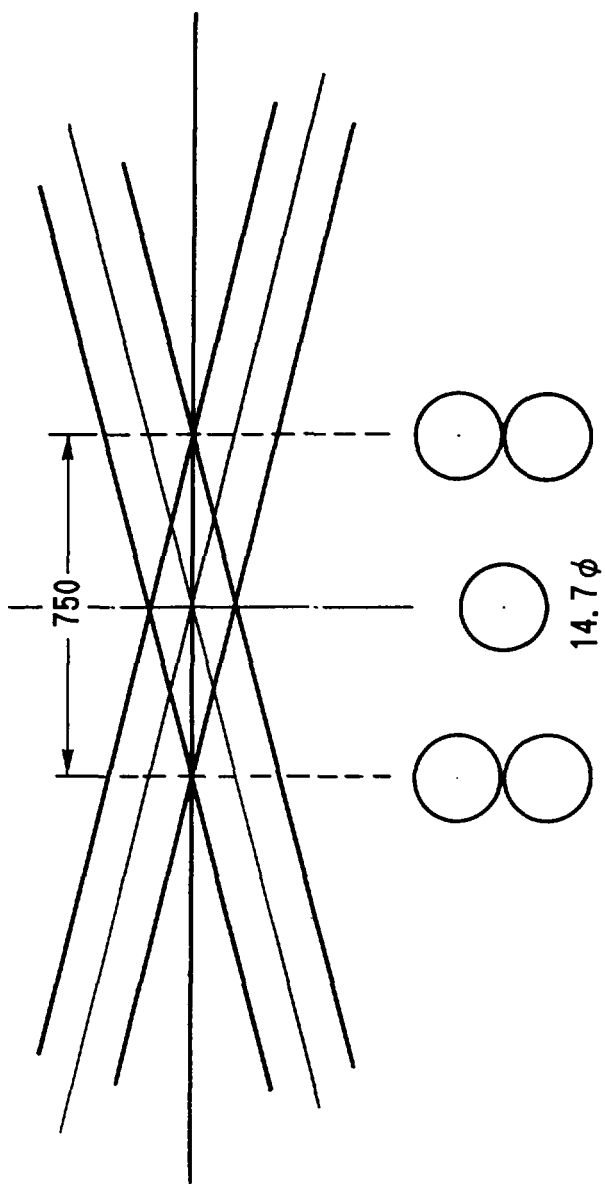


$$\theta = \frac{7.35}{735}$$

$$X = \frac{7.35}{735} \times 3000 = 58.8 \text{ mm}$$

粒子用クリアランス 20mm とっても
ミラー径 $a = 38 \text{ mm}$ とれる

第9図 光軸の傾きとミラー径



第 1 0 図 光の交叉とその断面

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J

1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バ	bar
ガ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラ	rad
レ	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m

1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²

1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa

1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²

1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq

1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy

1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eV および 1 u の値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- bar は、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘 度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)

= 4.184 J (熱化学)

= 4.1855 J (15 °C)

= 4.1868 J (国際蒸気表)

仕事率 1 PS (仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

新しい蓄積リング用入射装置の概念検討