

JAERI-Tech
2002-095



JP0350012



YAGレーザーを用いたH⁻ビーム
取出し法の概念検討

2002年12月

明午 伸一郎・長谷川 和男・池田 裕二郎・大井川 宏之
青木 延忠*・中川 敏*

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。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費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 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

YAG レーザーを用いた H^- ビーム取出し法の概念検討

日本原子力研究所東海研究所大強度陽子加速器施設開発センター
明午 伸一郎・長谷川 和男・池田 裕二郎・大井川 宏之
青木 延忠*・中川 敏**

(2002年10月25日受理)

原研・KEKの大強度陽子加速器計画において、加速器駆動未臨界システム(ADS)を用いた長寿命放射性核種の核変換技術に関する研究・開発として、未臨界炉物理実験を行う“核変換物理実験施設”と、ADSのターゲット及びビーム窓の熱構造設計及びシステム技術に関する実験を行う“核変換工学実験施設”を建設する計画である。核変換物理実験施設では未臨界状態の実験装置にLINACで加速された0.6 GeV陽子ビームを導入し、高速中性子増倍体系と核破砕中性子源を組み合わせた実験を行う。核変換物理実験施設は最大熱出力を500 W以下とするため、10 W以下の小電流の陽子ビームを用いる。一方、核変換工学実験施設では200 kWの大電流を入射するため、大電流運転と低電流運転の両立が必要となる。核変換物理実験施設のために低電流運転を行うことは技術的に困難が伴う。通常用いられる薄いフォイルによるビーム取出し方法では、フォイルによるビーム散乱があるために、厚い遮蔽が必要となり好ましくない。そこでレーザーを用いて小電流のビームを取出す方法について検討を行った。

本手法では、LINACから出射する H^- ビームにYAGレーザーを照射し H^0 ビームに荷電変換し、小電流の H^0 ビームを得る。 H^- イオンの光子による荷電変換反応断面積は波長が $1\ \mu\text{m}$ 付近にピークを持つために、発振波長 $1.06\ \mu\text{m}$ のYAGレーザーが適している。これにより、繰り返し周波数25 Hz、パルス当り2 Jの出力を持つレーザーで600 MeV陽子の10 Wの取出しが可能であることを示した。本手法では、レーザー照射の時間幅を制御することにより希望する幅のパルスビームの取出しが可能であることが特徴である。一方、レーザー衝突点付近に直線区間があると、ビームダクト内の残留ガスと H^- ビームとの相互作用によりバックグラウンド電流が大きくなる可能性がある。そこで、偏向電磁石内にレーザー衝突点を設けるような変換器を用いる方法を考案した。これにより、残留ガスとの相互作用で荷電変換された H^0 ビーム強度が大幅に減少できることを示した。これらの検討により核変換物理実験用の10 Wビーム取出し技術の見通しを得た。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

* (株) 東芝電力システム

** (株) 東芝

A Feasibility Study of H^- Beam Extraction Technique Using YAG Laser

Shin-ichiro MEIGO, Kazuo HASEGAWA, Yujiro IKEDA, Hiroyuki OIGAWA,
Nobutada AOKI* and Satoshi NAKAGAWA**

Center for Proton Accelerator Facilities
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 25, 2002)

Under a framework of JAERI-KEK joint project of high intensity proton accelerator, as for research and develop of the accelerator driven nuclear transmutation of the long lived radioactive nuclide, it is planed to built the Transmutation Physics Experiment Facility (TEF-P) and the Transmutation Engineering Experiment Facility (TEF-E). The TEF-P is used for the experiments for subcritical system coupled with a spallation neutron target bombarded with 600-MeV proton beam accelerated by the LINAC. To limit the maximum thermal power less than 500 W at the TEF-P, an incident beam power should be less than 10 W. On the contrary, at the TEF-E, high power beam of 200 kW is requested. Both high and low power beams are demanded for the transmutation facilities. It is difficult to deliver a low power beam to the TEF-P. Conventional beam extraction technique with a thin foil, is not desirable because the scattering of the beam at the foil requires the massive shield. Therefore, we study a new technique to extract a small portion of the beam precisely from the high intensity beam by using a laser beam.

By a laser beam, H^- in the beam from LINAC is partially changed to H^0 beam so that a low current H^0 beam can be obtained. As the cross section of the charge exchange reaction for H^- ions has a peak around at a wave length of $1 \mu\text{m}$ for photons, YAG laser is suitable for this charge exchange because of its $1.06 \mu\text{m}$ wave length. It is derived that 10 W beam for 600-MeV proton can be extracted by the YAG laser with power of 2 J for each pulse of 25 Hz. By this technique, the pulse width for the extracted beam can be controlled by changing the time width of laser irradiation. When a charge exchanger having the beam collide point existing in straight section, a background beam current of projectile, however, will be increased due to the interaction with the residual gas in the beam duct. Thus, a charge exchanger is devised having the beam collide point in a bending magnet. By using this charge exchanger, it is demonstrated that the possibility of the charge exchange due to interactions with residual gas can be drastically decrease. By the above studies, it is recognized that feasibility of the technique of beam extraction with the laser.

Keywords: Beam Extraction, Laser Charge Exchange, YAG Laser, H^- Beam
Nuclear Transmutaion, Accelerator Driven Subcritical System

*Toshiba power system Co., Ltd.

**Toshiba Co., Ltd.

目次

1	はじめに	1
2	原理	6
3	荷電変換に必要なレーザーの出力	8
4	必要なレーザー発振器の構成	12
5	偏向電磁石と一体化したレーザー荷電変換器の検討	26
6	レーザー伝送光学系の検討	28
7	レーザー制御系の検討	35
8	レーザー機器に必要なユーティリティー	37
9	結語	39
	謝辞	39
	参考文献	40

Contents

1	Introduction	1
2	Principle	6
3	Study of Required Laser Power for Charge Exchange	8
4	Required Structure of Laser Oscillator	12
5	Study of Laser Exchanger Combined with Bending Magnet	26
6	Study of Transport System for Laser Beam	28
7	Study of Control System for Laser	35
8	Utility Laser System	37
9	Summary	39
	Acknowledgements	39
	References	40

This is a blank page.

1 はじめに

原研・KEKの大強度陽子加速器計画[1]では、加速器駆動未臨界システム(ADS)を用いた長寿命放射性核種の核変換技術に関する研究・開発の一環として未臨界炉物理実験を行う“核変換物理実験施設”[2, 3]と、ADS特有の構造であるターゲット及びビーム窓の熱構造設計及びシステム技術に関する実験を行う“核変換工学実験施設”[4, 5]を建設する計画である。核変換物理実験施設では、未臨界状態の実験装置に陽子を入射し、高速中性子増倍体系と核破碎中性子源を組み合わせた実験を行う。また核変換工学実験施設では、ターゲットおよびビームウインドー等の照射による材料への影響を測定する実験を行う。核変換工学実験施設では、年間当り数DPAの照射損傷を与えることができる施設を目指している。

図1に統合計画の配置案を示す。統合計画では常伝導LINAC 400 MeVおよび超伝導LINAC 600 MeVを設置する予定である。常伝導LINACで加速された陽子は二方向に分離され、一方は3 GeVシンクロトロンに入射される。もう一方は超伝導LINACに入射され600 MeVまで加速される。上記実験施設では600 MeV陽子ビームを用いて実験を行う。

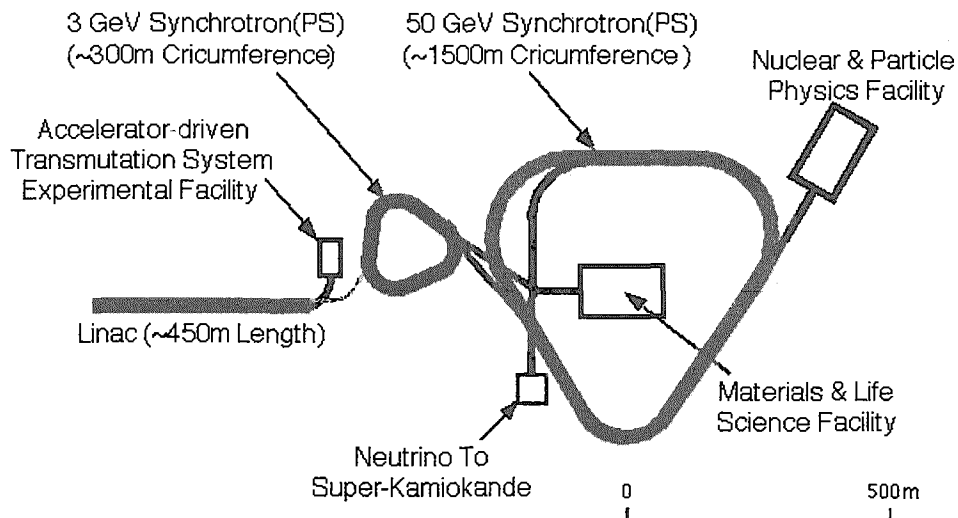


図1: 原研・KEK大強度陽子加速器配置案

1.1 陽子ビームのパラメータ

ここでLINACから出射されるビームのパラメータを表1に示す。0.6 GeVのLINACから出射される陽子ビームのパラメータと図2にパルスの時間構造を示す。陽子ビームはマイクロバンチ(324 MHz, 幅 ~1 ns)、中間パルス(1.4 MHz, 幅 396 ns)、マクロパルス(25 Hz, 幅 500 μ s)の構造から成り立つ。中間パルスは128個のマイクロバンチから成り立ち、マクロパルスは682個の中間パルスから成り立つ。マイクロバンチ、中間パルス、およびマクロパルス毎の出力はそれぞれ、92 mJ, 11.7 Jおよび8 kJとなる。超伝導の空洞(SCC)よりも下流側には、デバンチャーが存在しないために、実際のビームの時間幅は1 nsよりも広がっている可能性がある。

表 1: 超伝導 LINAC から出射されるビームパラメータ (暫定値)

エネルギー	600 MeV
平均ビーム電流	333 μ A
RF 周波数	324 MHz
非規格化エミッタンス (Total)	1.1 mm mrad
マクロパルス	平均ビーム電流 30mA ピーク電流 50 mA パルス幅 500 μ s 繰り返し周期 40 ms (25 Hz) 中間パルス数 682 パルス当たりの電荷 13.3 μ C パルス当たりの出力 8 kJ
中間パルス	平均ビーム電流 50mA パルス幅 396ns (休み 337 ns) 繰り返し周期 733 ns (1.36 MHz) マイクロバンチ数 128 パルス当たりの電荷 19.5 nC パルス当たりの出力 11.7 J
マイクロバンチ	パルス幅 \sim 1 ns 繰り返し周期 3.1 ns (324 MHz) パルス当たりの電荷 153 pC パルス当たりの出力 91.6 mJ

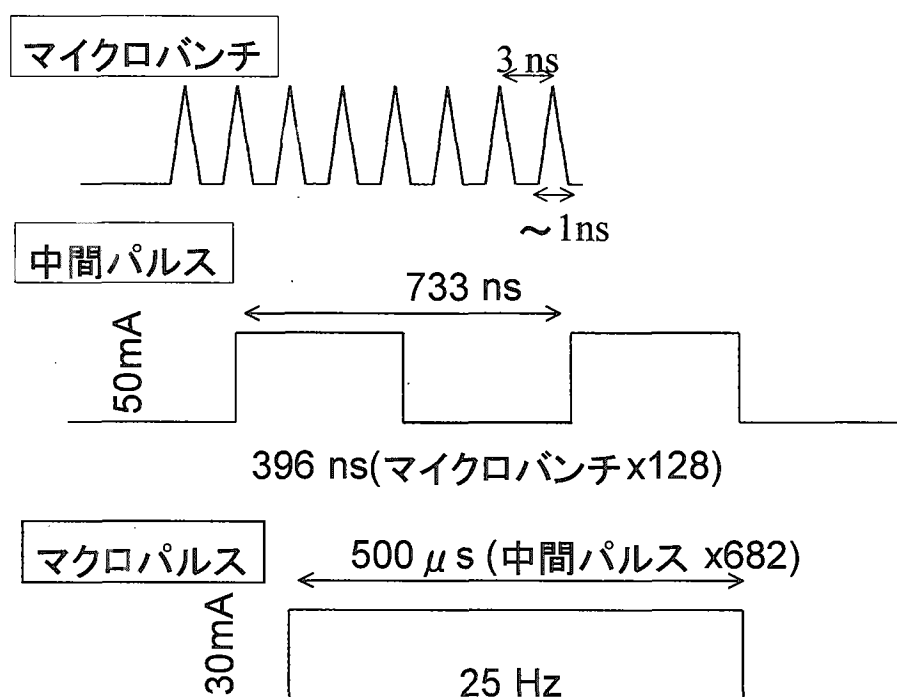


図 2: 600 MeV LINAC から出射されるパルスの時間構造

1.2 核変換工学および物理実験施設で必要とされるビームのパラメータ

核変換工学および物理実験施設で必要とされるビームのパラメータを表 2 に示す。核変換工学実験施設 (TEF-E) では、材料の照射損傷の実験を行うために細いビームが望まれる。このために、物理実験施設へのビームの取出しは以下に述べるように核変換工学実験施設におけるビーム径に対する影響を最小限にする必要がある。一方、核変換物理実験施設 (TEF-P) では最大熱出力を 500 W 以下とするため、数 W 程度の小電流の陽子ビームを用いる。核変換物理実験施設は中性子の時間的挙動の実験的検証を行うためにパルス運転を行う予定である。また、ターゲットから発生する中性子のスペクトルは飛行時間法により測定されるために、短パルスの陽子ビームが望まれる。その一方で、実際の ADS では、統合計画のようなパルス運転ではなく CW 運転が想定されている。このために、CW 運転における炉物理の実験的検証も可能とすることが望まれる。LINAC から出射されるマクロパルスは CW ビームとして見なすことができるために、マクロパルスの一部分を連続的に取出す準 CW 運転が望まれる。

1.3 核変換物理実験施設へのビーム取出し

核変換物理実験施設には超伝導 LINAC で加速された 0.6 GeV 陽子ビームを導入する。また核変換物理実験施設は数 W 程度の小電流の陽子ビームを用いる。核変換工学実験施設では 200 kW の大電流を長時間入射するので、核変換工学の大電流ビームと小電流取出しを同時に可能とすることが望ましい。統合計画全体では大電流のビームを目指しているので、核変換物理実験施設のためだけに低電流運転を行うことは技術的に困難が伴う。この問題を解決する方法の案として下

表 2: 実験施設で要求する陽子ビームのパラメータ

核変換工学実験施設	平均出力	200 kW
	平均ビーム電流	333 μ A
	繰り返し周期	40 ms (25 Hz)
	パルス幅	LINAC から出射されるものと同じ
	ターゲット上でのビーム直径	~ 200 mm
核変換物理実験施設	平均出力	≤ 10 W
	平均ビーム電流	≤ 16.7 nA
	繰り返し周期	40 ms (25 Hz)
	パルス幅	0.1 ps ~ 500 μ s 以下
	ターゲット上でのビーム直径	10~100 mm

記の方法がある。

1.4 候補とする低電流運転

1.4.1 1 パルスの取出し

通常の LINAC の運転は 25 Hz の運転であるが、このマクロパルスのうちある周期で強度の弱い 1 パルスを別に加速し、これを核変換物理実験施設に輸送することで、10 W 以下のビームを得ることが考えられる。しかし、この方法では統合計画における他の実験施設に対する影響が大きいために実際に適用することは困難である。さらに、LINAC に対して新たに低周波数運転の低エネルギービーム輸送系 (LEBT) および中エネルギービーム輸送系 (MEBT) のチョッパーを挿入してパルス毎に異なった動作や、RFQ およびイオン源などの二系統が必要になる等の困難を伴う。さらに、核変換物理実験施設では要求する可変パルス時間幅に対応できない。以上により、1 パルス取出しは実際的でない。

1.4.2 正負イオンを同時加速する方法

正イオンおよび負イオンの二系統を用意し、RFQ の上流で結合 (マージ) させる。パルスの逆の位相を利用することで、正負同時加速が可能と思われる。正イオンのみを、核変換物理実験施設へ輸送し低電流の運転が可能となる。しかしながら RFQ でマージさせるためには、イオン源と RFQ との距離を離す必要がある。統合計画では、負イオン源のビームの質をできるだけ良くするために、この距離を最短としているために適用できない。

1.4.3 フォイルによる二次ビームの取出し

核変換工学実験施設に輸送されるビームライン中に、薄いフォイルを配置し、散乱などで生じた二次ビームを核変換物理実験施設に輸送すれば小電流の取出しが可能である。この方法では物理的にある一定以上の強度を持つビームが出射されない安全上のメリットがあるものの、フォイルによるビーム散乱があるために、フォイル近辺の遮蔽体の増加、空気の放射化、および NOx ガ

スの生成等の対応が必要となる。さらに、二次ビームのエネルギーの選択は二極電磁石で行うが、同じ運動量を持つ陽子と π 中間子の区別ができない。以上によりフォイルを用いた2次ビーム取出しは、過度の設備対応が必要であると共に性能上の制約も大きい。さらに、この方法でもパルス時間幅を可変とすることは不可能である。

1.4.4 レーザーによる取出し

H^- イオンは光子と十分大きな反応断面積を持つために、容易に H^0 イオンとなる。この H^0 イオンと H^- イオンを電磁石で分離することにより小電流のビーム取出しが期待できる。また、既にLANLでは20 MeVのLINACの H^- ビーム診断用にレーザーによる荷電変換を用いている [6]。図3に示す方法で、LANLではビームのエミッタンス（進行方向、横方向）の測定を行った。LANLの測定と核変換物理実験施設のためのビーム取出しには陽子エネルギーの違いがあるものの、この原理を600 MeV陽子に適用することは十分可能と考えられる。さらにこの方法であれば、レーザー照射時間を変えることによりパルス幅を可変にした陽子ビーム照射が可能となり、核変換物理実験施設の要求を満たすことが可能となる。

本検討では、レーザーを用いて小電流のビームを取出す方法の概念検討を行った。また、これに必要な機器の検討を行った。

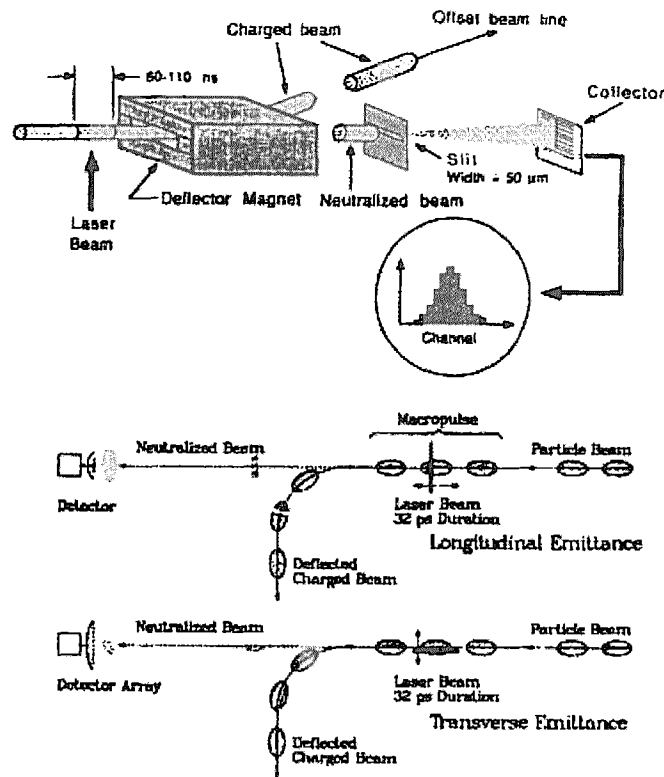


図3: LANLで行われた20 MeVのLINACの H^- ビームのためのレーザー荷電変換法の概要 [6]

2 原理

2.1 レーザーによる中性化

レーザー荷電変換器の原理を図4に示す。レーザーを H^- イオンに照射することにより H^- イオンを H^0 イオンに荷電変換する。 H^- イオンの第2電子は0.755 eVという低いエネルギーで H^0 イオンに結合しているために、赤外線から可視光程度の波長を持つ光で容易に電子を引き離すことができる。一方、 H^0 イオンの場合は、第1電子は結合エネルギーが2.3 eVと第2電子に比べて高いために光では電子を引き離すことは難しい。

2.2 H^+ イオンへの荷電変換

また H^0 イオンは電磁場中で曲がらないために、四極電磁石を用いて収斂することが不可能である。よって、 H^0 イオンを H^+ イオンに荷電変換して輸送することが必要である。 H^0 イオンの結合エネルギーが高いために外部から電磁場を印加して起こるローレンツストリッピングが生じ難い。そこで、本検討では薄いフォイルによる電子の剥ぎ取り（ストリッピング）により H^0 を H^+ イオンに荷電変換する。現在のところ、数 $100\mu\text{g}/\text{cm}^2$ のポリエチレンを荷電変換フォイルとして使用することを予定している。この荷電変換の断面積が 10^{-18}cm^2 と大きいために、ほぼ100%の荷電変換を行う。この場合フォイルに入射する H^0 ビームの電流は、 H^+ に等価な値として僅か数Wであるためにフォイルにおけるビームの散乱は問題とならない。さらに、何らかの要因で大電流ビームがフォイルに入射してもフォイルの溶融により、これが核変換物理実験施設に入射することを未然に防ぐことが可能である。

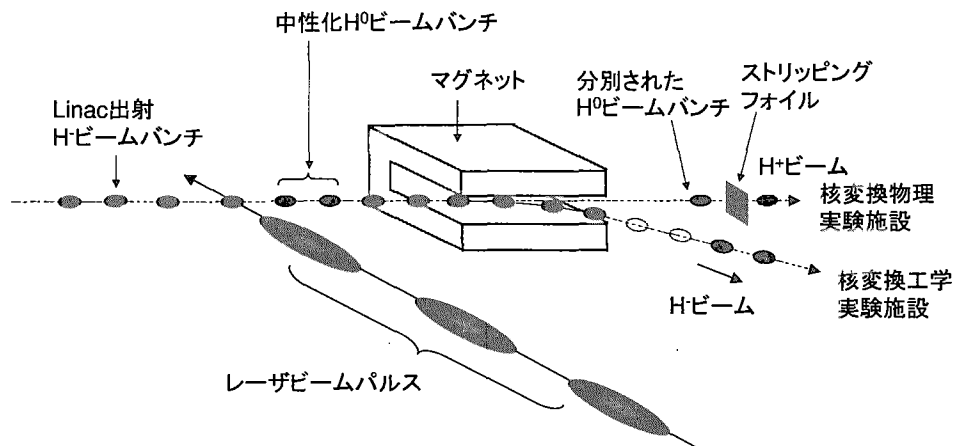


図4: レーザー取出しの原理

2.3 光子による荷電変換断面積

光子による H^- イオンの荷電変換断面積を図5に示す。イオンの荷電変換断面積は $\sim 0.9\mu\text{m}^2$ で最大となるために、基本波長1,064 nmのYAGレーザーを使用と効率的に荷電変換を行うことができる。また、YAGレーザーは安価で手に入りやすいので好都合である。

H⁻ イオンからレーザーを観測する場合、波長がドップラー効果により変化する。H⁻ イオンからレーザーを見ると、静止座標系でλの波長がドップラー効果により式(1)に従ってλ'となる。

$$\lambda' = \lambda/\gamma(1 + \beta\cos\phi), \quad (1)$$

(1)式で、H⁻ イオンの速度をβc、光速をc、 $1/\sqrt{1-\beta^2}$ をγ、イオンとレーザーのなす角度をφとする。600 MeV 陽子に対してβ = 0.792, γ = 1.64 であるため、交叉角 90° の場合には波長は 650 nm となる。これにより荷電変換断面積は、 $\sigma = 3.6 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ となる。なおドップラー効果により、H⁻ イオンから見た波長は荷電変換のピークとなる波長 850 nm よりも短くなるものの、静止座標における断面積とほぼ同程度となっている。

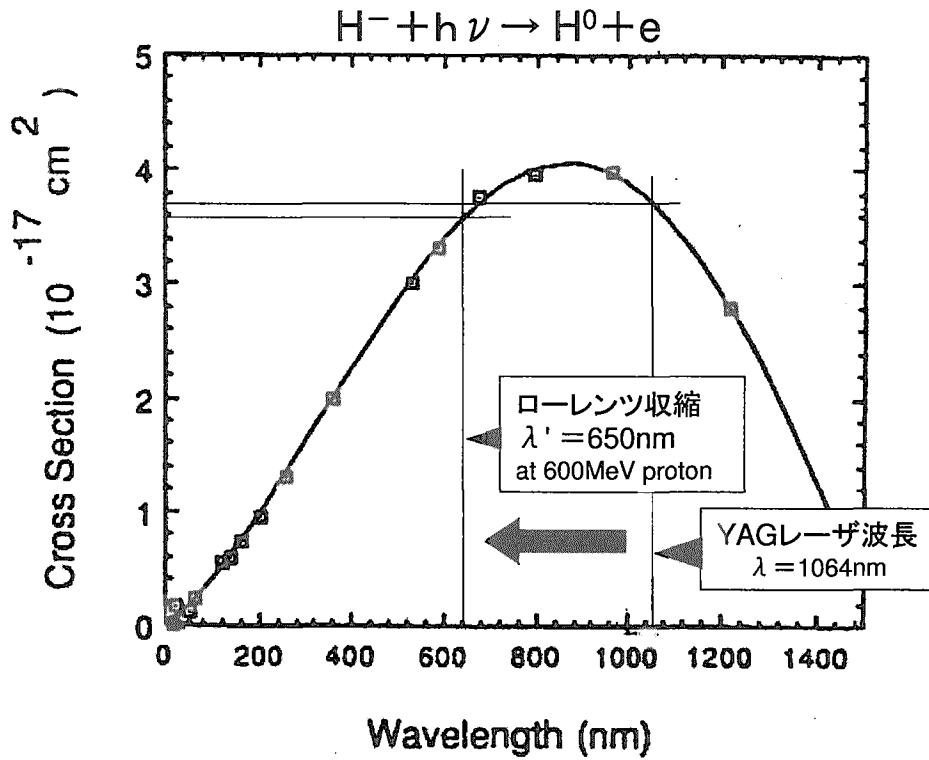


図5: 光子とH⁻イオンとの荷電変換断面積。600 MeV ビームに対する波長はローレンツ収縮により 649.6 nm となる。

3 荷電変換に必要なレーザーの出力

ここでは、荷電変換に必要なレーザーの出力について検討を行う。

3.1 荷電変換効率

H^- ビームとレーザーの光子との相互作用による、 H^0 ビームの生成を衝突型加速器に用いられる物理量であるルミノシティを用いて定量的に評価する。図 6 に示す体系でレーザーを入射する場合において、中性粒子の生成は

$$R = L\sigma = N_1P, \quad (2)$$

となる。ここで R はレーザー 1 パルス当たりの変換された中性粒子の数、 L は荷電変換反応が行われている時間に関して積分したルミノシティ (cm^{-2})、 σ は荷電変換断面積 (cm^2)、 N_1 はレーザー照射時間を通して通過する H^- イオン数、 P はレーザー 1 パルス当たりの変換効率である。時間積分したルミノシティは以下の式で導出される、

$$L = \int \int \rho_1 \rho_2 \sqrt{(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)^2 - (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2)^2 / c^2} dV dt, \quad (3)$$

上記の添え字の 1, 2 は H^- 、レーザーの光子を意味し、 \mathbf{v} は粒子速度、 ρ は粒子密度、 V 及び t は二つの粒子が重なりあう体積および時間である。時間積分をしたルミノシティは、

$$L = \int \int c \rho_1 \rho_2 (1 + \beta \cos \phi) dV dt, \quad (4)$$

となる。レーザーの照射時間を τ 、 H^- およびレーザービームの分布が一様で正方形の断面を持つとすると、それぞれの粒子密度は

$$\rho_1 = N_1 / D^2 \beta c \tau, \quad (5)$$

$$\rho_2 = E \lambda / hc^2 F^2 \tau, \quad (6)$$

ここで、

D, F : H^- ビームおよびレーザービーム断面の一片の長さ (m)

E : レーザー 1 パルスあたりの出力 (J)

h : プランク定数. 6.62×10^{-34} (J·s)

とする。ここで、レーザービームの照射時間の方が陽子ビームの 1 バンチが通過するよりも短く、レーザービームがコリメートされているとすると (4) 式は体積および時間積分項に変数分離することが可能である。この体積・時間積分項は

$$\int \int dV dt = \tau F \min(D^2, F^2) / \sin \phi, \quad (7)$$

となる。以上より

$$L = N_1 \frac{E \lambda}{\tau hc} \frac{1 + \beta \cos \phi}{\beta c \sin \phi} \frac{F}{\max(D^2, F^2)}, \quad (8)$$

となる。ここで陽子ビームは微少区間 df を進むと荷電変換反応により減衰するため、この減衰は

$$-dN_1(f) = dR = \sigma N_1(f) \frac{E \lambda}{\tau hc} \frac{1 + \beta \cos \phi}{\beta c \sin \phi} \frac{df}{\max(D^2, F^2)}, \quad (9)$$

となる。上式を $N_1(0) = N_1$ の条件で解くと、

$$R = N_1(0) - N_1(F) = N_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\sigma \frac{E \lambda}{\tau hc} \frac{1 + \beta \cos \phi}{\beta c \sin \phi} \frac{F}{\max(D^2, F^2)}\right) \right\}, \quad (10)$$

となる。よってレーザー照射により H^- イオンが H^0 イオンに変換される効率 P は (2) 式より

$$P = 1 - \exp\left(-\sigma \frac{E \lambda}{\tau hc} \frac{1 + \beta \cos \phi}{\beta c \sin \phi} \frac{F}{\max(D^2, F^2)}\right), \quad (11)$$

となる。ここで、レーザーを交叉角 90° で照射し、レーザーの照射面積が H^- ビームよりも大きい ($F > D$) とすると変換効率 P および H^0 の数 R は

$$P = 1 - \exp\left(-\sigma \frac{E \lambda}{\tau hc} \frac{1}{\beta c F}\right), R = N_1 P, \quad (12)$$

となる。上記の P よりレーザーの1パルスあたりのエネルギーを大きくすることにより変換効率が大きくなることがわかる。レーザーの一片の長さを1 cm とすると、レーザーのパルス当りの出力が1 J、パルス時間幅を10 ns の場合では、変換効率 P は

$$P = 1 - \exp\left(-3.6 \times 10^{-21} \frac{1}{1 \times 10^{-8}} \frac{1.06 \times 10^{-6}}{6.62 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} \frac{1}{0.792 \times 3 \times 10^8 \times 1 \times 10^{-2}}\right) = 55\%$$

と大きな変換効率を得ることができる。一方10 W 程度の出力を持つCWレーザーでは、変換効率は 8×10^{-9} と小さい。よって大出力の陽子電流を得るためには、出力の大きいパルスレーザーが必要となる。しかしながら、後述のように10 W 程度の H^0 ビームを得るのには、市販のレーザー程度の強度で十分である。

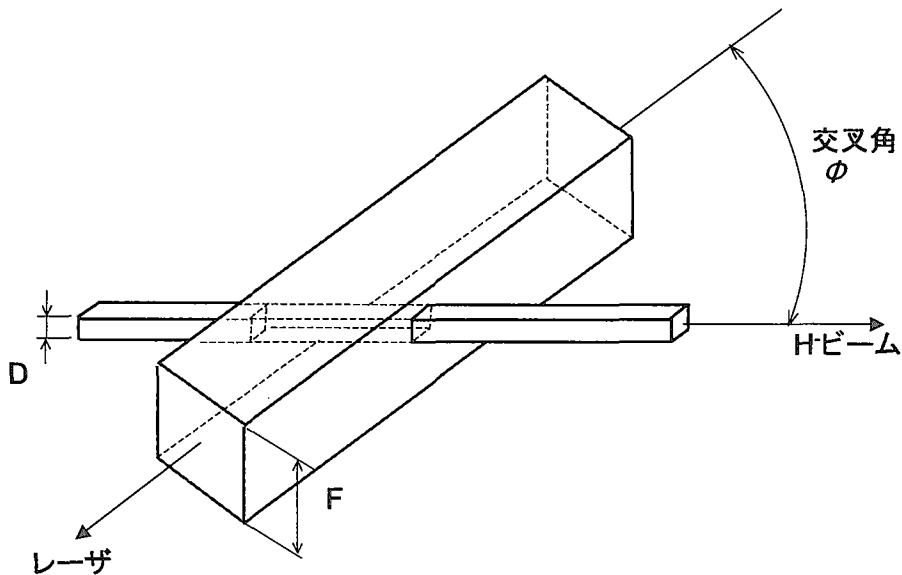


図6: 荷電変換効率の計算に用いた体系

3.1.1 垂直衝突の場合の最適化

ここで、垂直衝突の場合の陽子ビームおよびレーザービームの関係について考察する。3.1項では陽子ビームを正方形として取り扱ったが、ここでは横幅（レーザーが進行する厚さ） a および高さ b の長方形のビームとする。レーザーのビーム形状は、以上の検討と同様に、一片が F の正方形で H^- ビームに水平方向から垂直に入射するものとする。ここで、(7)式の体積・時間積分項は

$$\begin{aligned} \iint dV dt &= F^2 a \tau \quad (b > F) \\ &= F a b \tau \quad (b < F), \end{aligned} \quad (13)$$

となるので、変換効率 P は

$$\begin{aligned} P &= 1 - \exp(-C/b) \sim C/b \quad (b > F) \\ &= 1 - \exp(-C/F) \sim C/F \quad (b < F) \\ C &\equiv E/\tau\sigma\lambda/hc\beta c, \end{aligned} \quad (14)$$

となる。上式の C はビーム形状に依存しないために、変換効率は陽子とレーザービームの垂直方向の幅が等しい($b=F$)の場合に最も高くなることがわかる。また、変換効率は H^- ビームの水平方向の幅に関して依存しないので、衝突点での H^- ビームの垂直方向の幅を小さくすることで変換効率が向上大きくなる。これは、レーザービームが H^- ビームを通過する長さが長くなるためである。よって、変換効率を向上させるためには、荷電変換器内の H^- ビームの垂直幅を小さくするオブティクスの方が良い。

3.1.2 レーザーを正面衝突させる場合

レーザーを H^- ビームに正面衝突させる場合には、(11)式の分母が0となるために無限大になるが、(7)式の体積と時間の積分項は

$$\iint dV dt = AL\tau, \quad (15)$$

となる。ここで L はレーザーが H^- ビームを横切る長さ、 A はレーザーまたは H^- ビームのどちらか小さいビーム形状の断面積である。これより変換効率は、ビーム形状の大きい断面積を A' とすると、

$$P = 1 - \exp\left(-CA'L\frac{1+\beta}{\beta}\right), \quad (16)$$

となり横切る長さに対してほぼ比例する。この場合には、 H^0 ビームのパルス幅 T_0 は

$$T_0 = \tau + L/c, \quad (17)$$

となる。仮に30 psのパルス幅のレーザーを30 cmに亘って照射すると、 T_0 は1.03 nsとなり、パルス幅は非常に短い場合にはレーザーの衝突点の通過時間が支配的になる。

正面衝突の場合には、荷電変換が H^- イオン進行方向に行われるため、 H^0 ビームのビームオブティクスのパラメータ(Twissパラメータ)が変換点により異なる値を持つ。よって、 H^0 ビームを輸送するオブティクスが成立するのは困難なので、實際上正面衝突の方法は用いることはできない。

なお、正面衝突の場合にはドップラー効果により H^- イオンにおけるレーザー波長は360 nmとなり、荷電変換断面積が垂直衝突の場合に比べ約半分となるため、この点においても望ましくない。

3.2 パルス幅およびビーム径と取出しビーム出力の関係

レーザーパルス幅が 10~40 ns の場合の、荷電変換効率および取出しビーム出力を (12) 式を用いて計算した。レーザービームは H^- ビームに対して垂直に入射するとし、各々のビームの垂直幅を 6 mm として計算した。この結果を図 7 に示す。パルス幅 20 ns, パルス当りの出力 2 J のレーザーを用いることで目標とする 10 W のビーム出力を得ることが可能であることがわかる。

図 7 を詳細に検討すると、パルス当りのレーザー出力が 0.2 J 以下の場合では、荷電変換効率はパルス幅 10 ns の方が 20 ns に比べて約 2 倍程度であることがわかる。レーザー出力が 1 J 以上になると、減衰による効果が顕著になってくる。また、レーザー出力が 2 J 程度になると、パルス幅 10 ns および 20 ns の場合においてほぼ 100% の荷電変換効率を持つ。図 7 に変換された H^0 イオンのビーム強度も示す。変換ビームの強度は、荷電変換効率が低い場合にはレーザーパルス幅によらずレーザー出力に比例する。荷電変換効率が大きくなりほぼ 100% の場合には (12) 式のレーザー照射通過区間を通過する H^- イオンの数 (N_1) がパルス幅に比例するため、取出し強度はパルス幅に比例する。このために、20 ns のパルス幅の取出し強度は 10 ns の場合の 2 倍の値となる。従って変換効率 100% 程度になる場合には、取出しビームを制限するためにパルス幅に対するモニターが必要となる。

また、ビームの垂直幅に関する検討を行った。レーザーと H^- ビームの垂直幅が同一として、レーザーパルス幅を 20 ns とする場合の結果を図 8 に示す。ビーム出力に関わらず、できるだけビームを垂直方向に関して絞ることで取出しビーム強度を大きくできることがわかる。

なお、ここでは H^- イオンビームが連続状に入射としたが、実際には陽子ビームがマイクロバンチの構造を持つために注意が必要である。このために、 H^- イオンとの同期が重要になる。

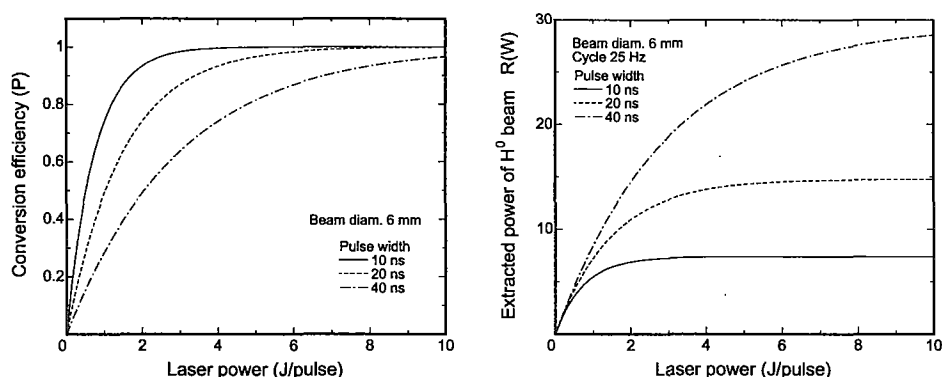


図 7: レーザーパルス幅と荷電変換効率および取出しビーム強度の関係

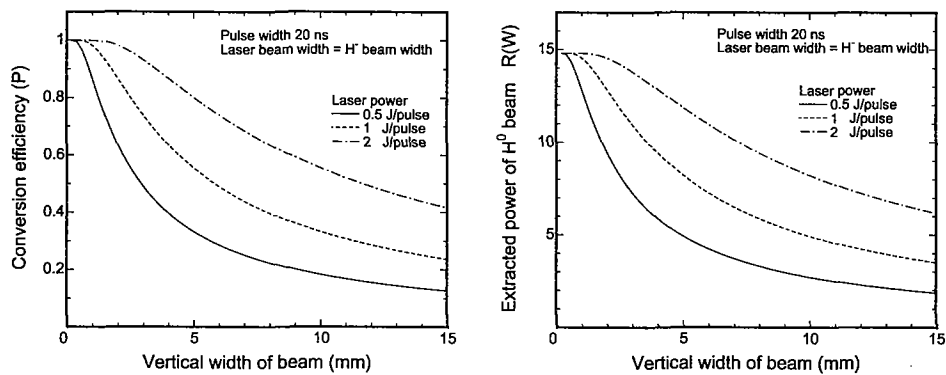


図8: レーザービームの垂直幅と荷電変換効率および取出しビーム強度の関係

4 必要なレーザー発振器の構成

核変換物理実験施設で要求される CW ビームおよびパルスビームの取出しに必要なとするレーザー機器の仕様について検討を行う。

4.1 レーザー発振形態

図9にレーザーの発振形態を示す。レーザー光はYAGロッドをランプおよびLDによる励起光を与えて共振させ生じる。レーザーの発振形態はCW発振とパルス発振に大きく二つの形態に分けることができる。

4.1.1 CW 発振レーザー

YAGロッドの励起を連続的に行えばCWのレーザーの発振が可能となる。市販されているCW発振のレーザーの最大出力は数10Wである。このため取出されるビームの強度は10mWとなり十分な陽子ビーム強度を得ることができない。よって、CW発振レーザーを用いることは弱電流を望む実験を除き現実的でないと考えられる。

4.1.2 パルス発振

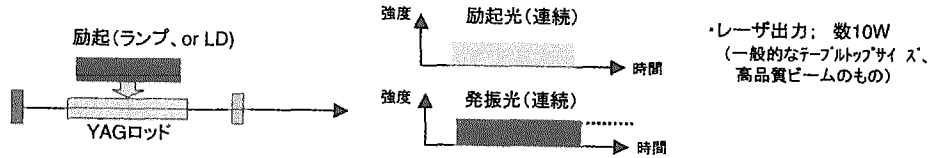
励起をパルスの行的に行うことにより、パルスレーザーの発振が可能となる。パルス発振の方法としては、Qスイッチを用いる方法とモードロックパルスを用いる方法がある。

レーザービームのパルス幅が数ns～数100nsの場合にはQスイッチを用いたパルス発振が適用可能である。Qスイッチを用いる方法は電気光学素子(EO)によるEO-Qスイッチ、音響光学素子(AO)によるAO-Qスイッチを用いる方法がある。EO-Qスイッチを用いる場合にはパルスの繰り返し周波数は数十Hz程度であるが、短い時間幅(～10ns)のレーザー光を得ることができる。一方AO-Qスイッチを用いる場合には比較的早い繰り返しパルスのレーザー光を得ることができるが、パルスの幅としては～100ns程度となる。

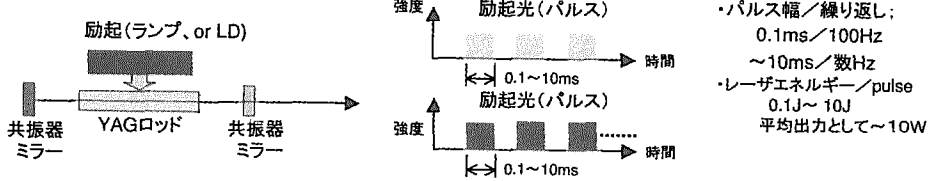
Qスイッチによる時間幅が1ns以下のパルスが発生するのは困難であるため、これよりも短い

場合にはモードロック発振を用いる。これによりパルス幅が数 10 ps~1 ns までのパルス幅を得ることができる。一般的なモードロック発振器のパルス幅は、30 ~ 60 ps 程度であるが、共振器内または共振器外に波長狭帯化素子（エタロン）を挿入してスペクトル幅を縮小することによって光パルス幅を最大 0.2ns 程度まで拡張することが可能となる。またモードロック発振を用いることにより繰り返しは数 10~500 MHz と早くすることが可能となる。

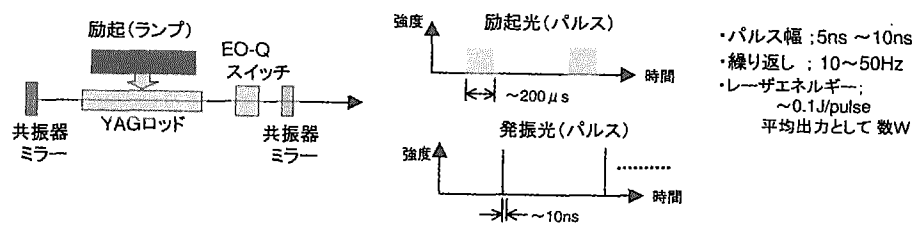
(1) CW発振



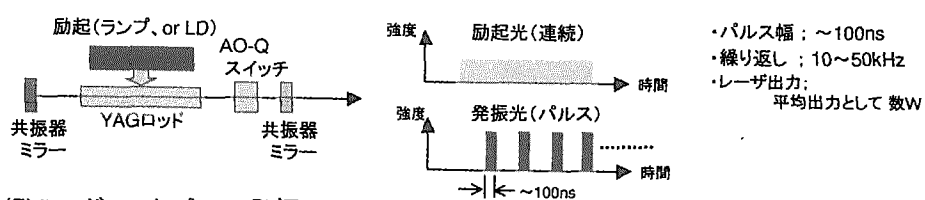
(2) パルス発振



(3) Qスイッチーパルス発振(Giant-pulse)



(4) Qスイッチーパルス発振(高繰り返し)



(5) モードロックパルス発振

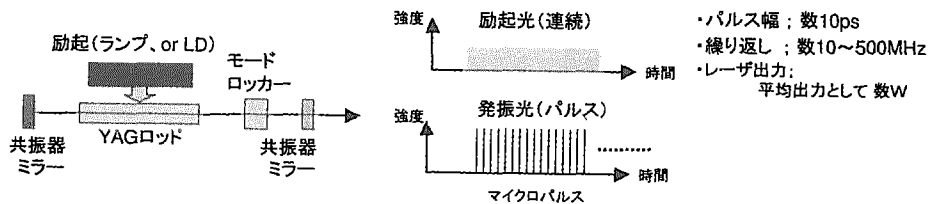


図 9: レーザー発振の形態

4.2 準 CW ビーム取出しの検討

¹ 準 CW とは LINAC の運転と全く同一なパルス構造を持たせた運転形態であり、マクロパルス幅 0.5 ms, 繰り返し周期 25 Hz で運転する方法である。完全に CW のレーザーを用いた取出し方法

の場合には、10 W の出力を得るためにはかなり大出力レーザーを必要とするので不可能である。そこで、図 10 に示す方法でビームの取出しを行う。ランプを用いて 0.5 ms の励起を行い、レーザー光を生成する。このレーザー光にはジッタリングがかなり含まれているので、炉物理実験で必要とされる時間均一のビームを得るために、ポッケルスセルを用いて強度の均一化を行う。この均一度を光波形センサーによるフィードバックを用いて均一化を行う。

本取り出し法にはもう一つの手法がある。それは 0.2 ms の幅のレーザー光を時間をずらして積み重ねることにより 0.5 ms の幅のレーザーを合成する方法である。このレーザー機器の概念を図 11 に示す。この手法には多数のレーザー発振器を必要とするので、コストアップに繋がることや、レーザー光の繋ぎの部分の均一度に問題があると思われる。

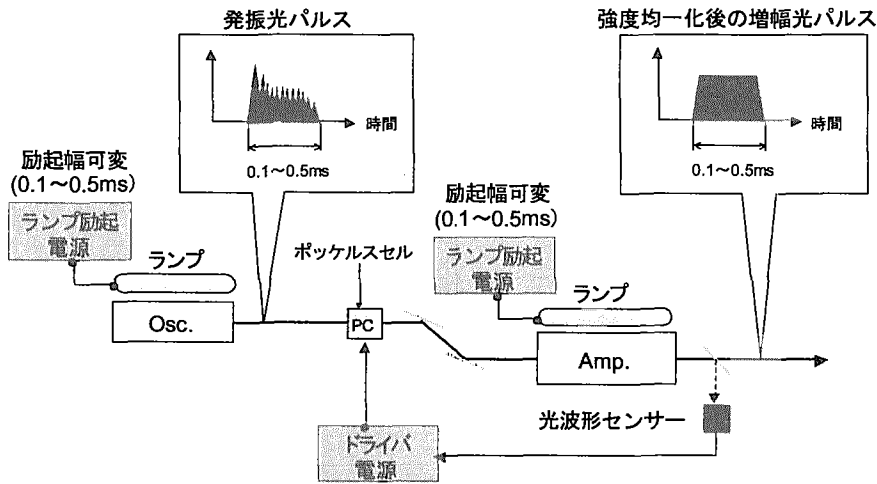


図 10: 準 CW 運転用のレーザー発振器の概念 1. 長パルス発振型 YAG レーザーとパルススモウザーの適用。

4.3 パルスビーム取出しの検討

4.3.1 パルス幅 10~20 ns の場合

パルス幅が 10 ~ 20 ns の場合には Q スイッチを用いることにより簡易に取出すことが可能である。レーザーの機器の概念を図 12 に、実際使用する機器の構成を図 13 に示す。10 ns の幅の場合には 1 台の Q スイッチレーザーにより、ビーム取出しが可能である。幅が 10 ~ 20 ns の場合には二台のレーザーと半透過ミラーを用いれば可能である。この概念を図 14 に示す。10 W 取出すためには、5 ミクロバッチのパルスをはほぼ 100% の変換する必要があるために、15 ns 幅のレーザーを必要とするが、これは図 14 に示す方法により可能である。

よってパルス幅が 10 ~ 20 ns の場合には特に大きな問題を伴うことにビームの取出しが可能であることがわかった。

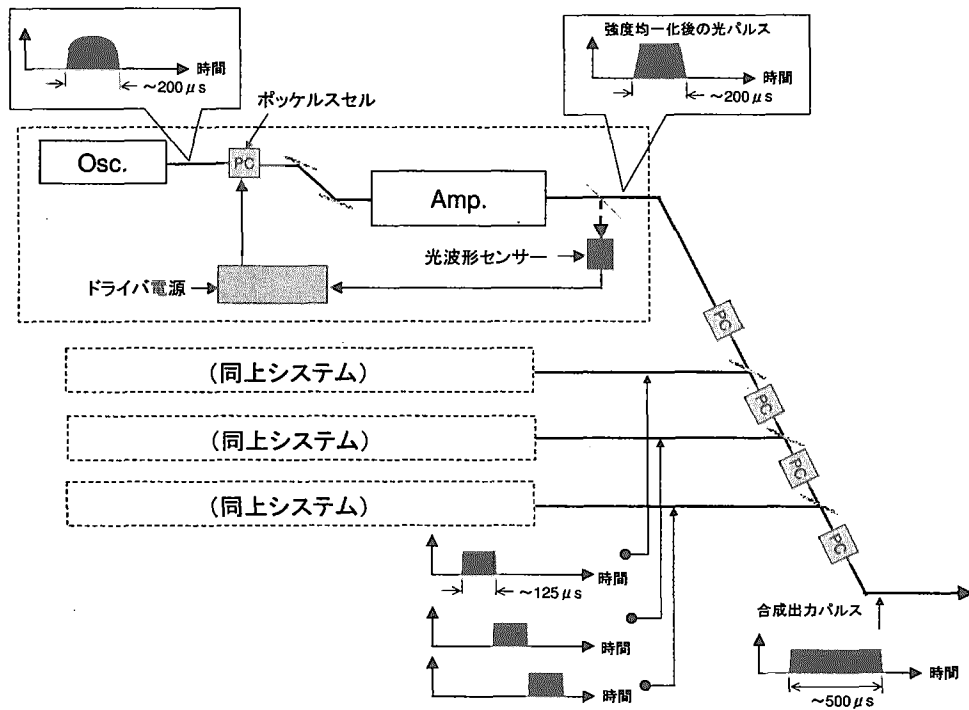


図 11: 準 CW 運転用のレーザー発振器の概念 2. 多重 YAG レーザー合成による適用.

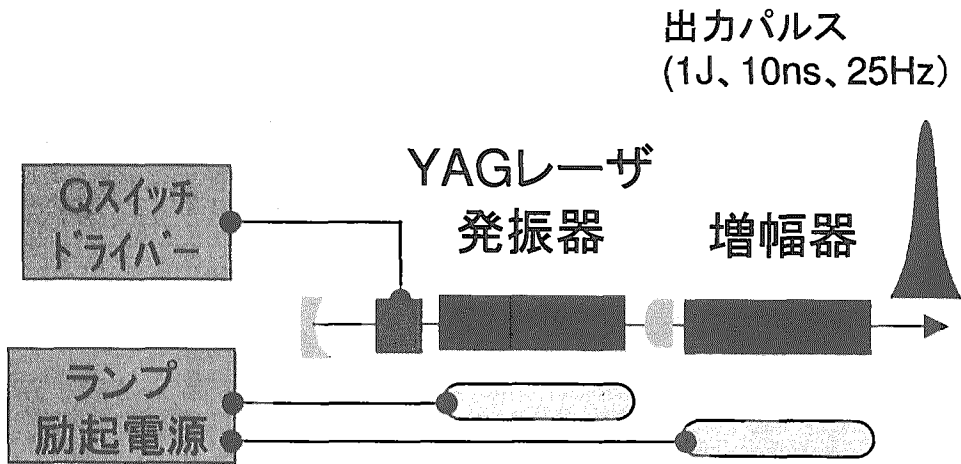
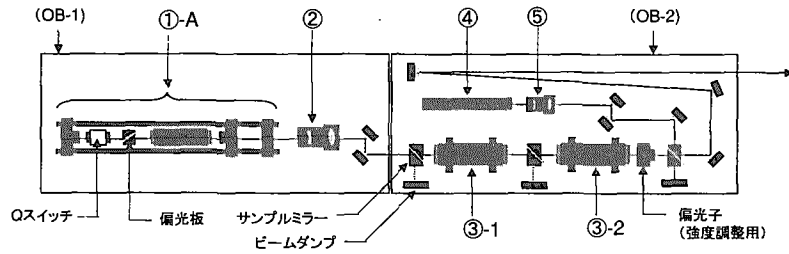


図 12: Q スイッチを用いたレーザーの機器の概念



(構成ユニット)

No.	名称
①-A	Nd:YAG 発振器: 6mm φ ロッドユニット、駆動電源ユニット、 カーボンロッドベース、共振器ミラー、 偏光板、Q スイッチ、Q スイッチ駆動電源
②	ビームエキスパンダー
③-1,2	Nd:YAG 増幅器 (2set) 9mm φ ロッドユニット、駆動電源ユニット
④	プローブレザ (He-Ne レーザ)
⑤	プローブレザ用ビームエキスパンダー
OB-1,2	光学ベンチ (2set)
その他	YAG 発振器ビームステアリングミラー×2、 He-Ne ビームステアリングミラー×3、 モニタ用サンプリングミラー×3、 伝送用ミラー×3

(構成仕様)

・発振波長	: 1064nm
・出力エネルギー	: 発振器 0.2J 1 段増幅 0.6J 2 段増幅 1.5J
・繰り返し周波数	: 25Hz
・パルス幅	: <9ns
・タイミングジッター	: <±1ns

図 13: Q スイッチを用いたレーザー機器の構成

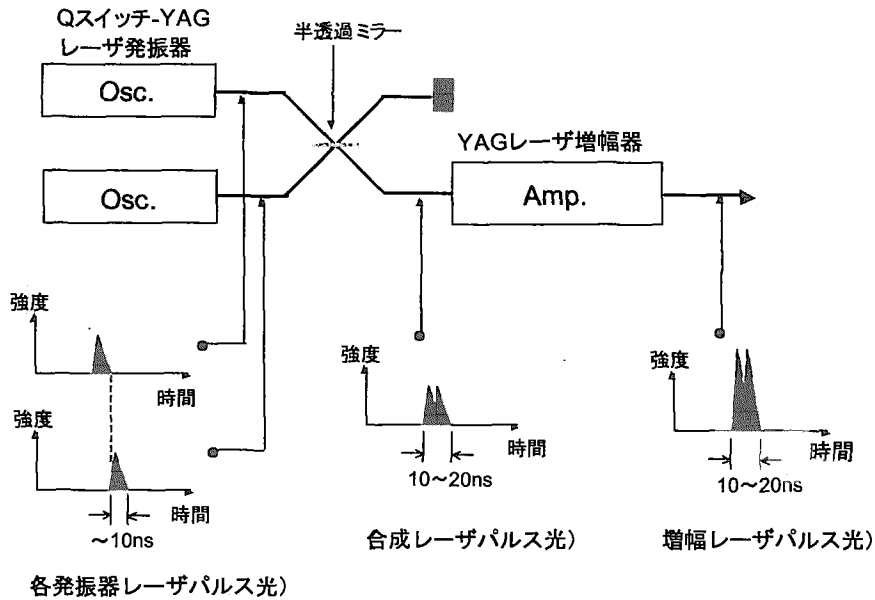


図 14: パルス幅 10~20 ns のレーザーシステム概念

4.3.2 パルス幅 0.1~5 ns の場合

パルス幅が 0.1 ~ 5 ns の場合には、一般的にパルスレーザーで良く用いられる Q スイッチレーザーでは難しい。このために、モードロックレーザーを用いる。

図 15, 16 に必要とするレーザー機器の概念および構成を示す。モードロック発振器で発生したレーザー光 (パルス幅 50 ps) に波長狭帯化素子を透過させパルス幅を 200 ps に広げる。EO タイプのポッケルスセルで構成したパルススライサーで 25 Hz のパルスを発生させ、それを再生増幅器に入射してパルス強度を 10^5 倍程度にまで増幅する。さらに、増幅器を通して必要な強度になるまで増幅するが、ピーク強度が数 100 MW 程度となると YAG レーザー増幅器表面の損傷しきい値に達するため、増幅器の段数は 1 ~ 2 段に限られる。このために出力されるレーザービームはパルス当り 20 mJ 程度になる。レーザービーム径を $\phi 3$ mm とすると、変換効率は 93% となるために、 H^- ビームの時間幅とレーザーの時間幅が同一の場合には最大変換出力は 2.2 W となる。レーザービームのパルス幅が 1 ns より短い場合には、 H^0 ビームのマクロバンチの広がり (~ 1 ns) が無視できなくなるため、実際に取出される H^0 ビームの出力は H^+ ビームの広がりを考慮する必要がある。 H^- ビームのマクロバンチの時間構造をガウス分布 ($3\sigma = 1$ ns) として、簡単に評価してみる。レーザー照射中の 0.2 ns に照射時間に含まれるビーム電力は 1 パルス当り 21.6 mJ となる。レーザービーム径を $\phi 3$ mm とすると変換効率は 93% であるため、マクロバンチの時間構造を考慮すると 0.5 mW となり、マクロバンチの広がりを無視した場合に比べ減る。短パルス幅 (≤ 1 ns) の取出しを行う場合には、この減少を考慮する必要がある。

取出すパルス幅が 1 ~ 5 ns の場合にはマルチパスを用いた光学系が考えられる。図 17 に示すマルチパス光学系をレーザー衝突点に置き、単一パルスを重畳させることによりパルス幅を広げることで可能となる。しかしながら、この方法はミラーのコーティング耐放射線性や荷電変換器内部にミラーを設置すること等の問題があるために簡単ではない。

以上よりモードロックレーザーによりパルス幅が 0.2 ns の取出しは可能であるが、1~5 ns の場合には今後の検討を要する。

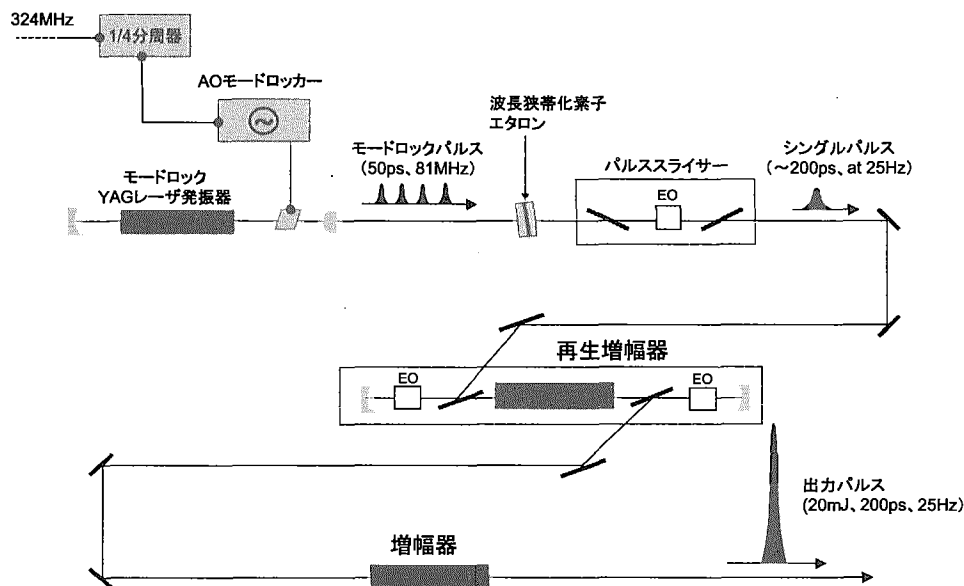


図 15: モードロックレーザー発振器の概念

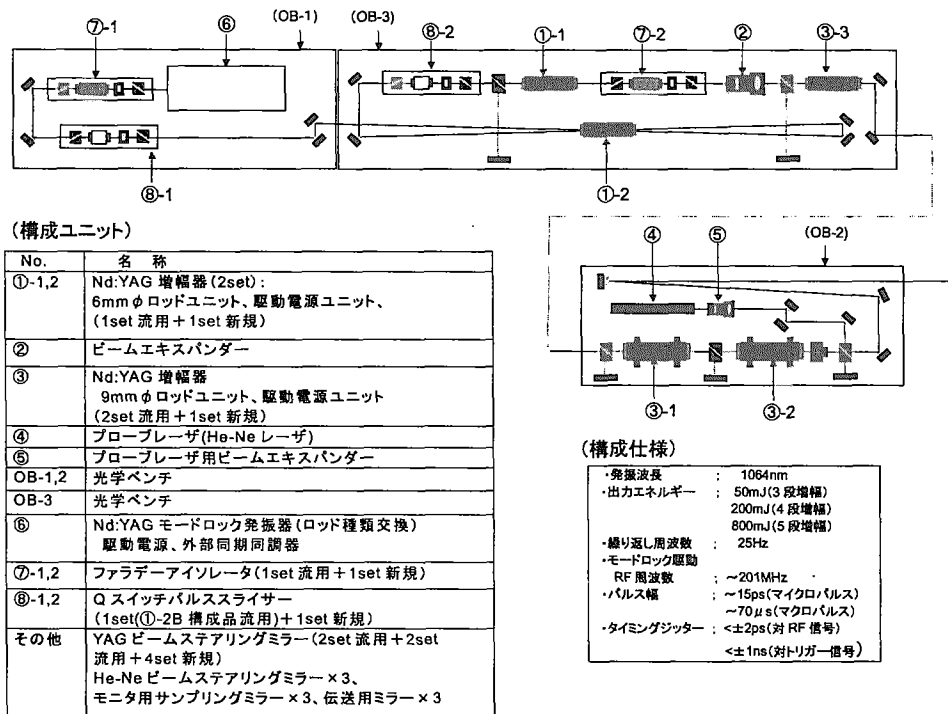


図 16: モードロックレーザー発振器の構成

4.4 大電流ビーム取出しの検討

統合計画において、現在のところ 10 W ビームの取出しが必要であるが、将来の計画において、より強度の強いビームの取出しが必要になる可能性がある。特に高エネルギー中性子に対する断面積およびマイナーアクチノイドに対する数 MeV 程度の中性子断面積測定には入射ビーム強度を数 100 W の短パルス (≤ 1 ns) にすることが要求される。これらの断面積測定のために数 100 W で数 ns の短パルスビーム取出しが望ましい。短パルスビームで大電流ビームを取出すためには、ビームを取出す繰り返し周波数を上げる必要がある。そこで、パルス幅 0.2~3 ns、繰り返し 20 MHz 程度でビームを取出す方法について検討を行う。

この要求に対応した、レーザーシステムの概念を図 18 に示す。システムではモードロック YAG レーザー発振器とパルストレイン増幅システムをさらに改良したものをを用いている。大強度の陽子ビームを取出すためには、マイクロバンチおよび中間パルス構造に同調したレーザーパルスを照射することが効果的な手法である。そのため、初めにモードロック YAG レーザー発振器から出射されるマイクロパルスを数 10 μs だけ取り出したパルス列 (パルストレイン) を作成し、次に増幅器で必要な強度になるまで増幅していくシステム構成を考える。モードロック YAG レーザー発振器のパルス幅は、図 15 に示した構成と同様に波長狭帯化素子を用いて 0.2 ns 程度に拡張する。モードロック発振器の繰り返し周波数 f は c 共振器長 L によって $f = c/2L$ の関係で決まるので、 $f = 20$ MHz では $L=7.5$ m と非常に長いものとなる。従って一般的なモードロック発振器では、 $f = 81$ MHz ($L=1.85$ m) 相当のものがほぼ下限値となるものと考えられる。ここでは 81 MHz のモードロック発振器からの出射パルスを 20 MHz の周波数で駆動する AO モジュールで分周して 20MHz のパルスとして取り出す構成をとることを考える。また、このパルス分周方式では、切

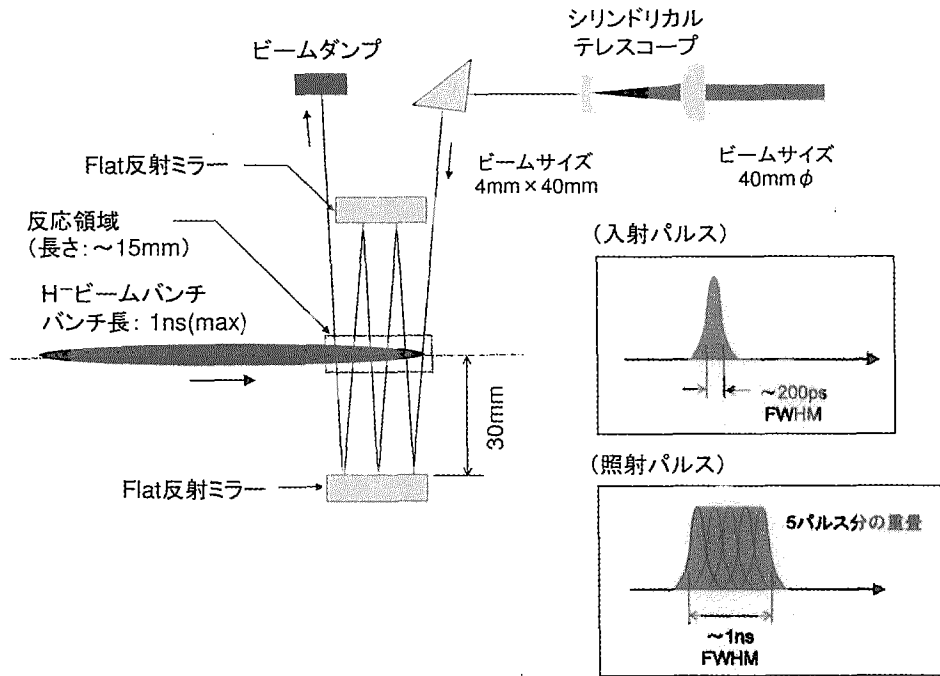


図 17: マルチパス光学系によるパルス幅の拡張

り出しの効率は AO 素子内の回折効率によって決まり、これはそれほど高い値は望めない (10%程度)。また、分周化するだけでも強度低下が生じるので、最終的な出射パルスの強度は非常に小さな値となり、これは増幅器を通して強度を増倍するときに非常にマイナスの要因となる。従って前置増幅器におけるパス数を 8 パス以上に増加したマルチパス方式を用いた前置増幅器構成にすることが必要となる。

陽子ビーム出力については、評価を行う。条件として下記の事を仮定する。

- Hビームのマイクロパルス幅 : 0.2 ns (レーザーパルス幅と同等)
- 陽子ビームエネルギー/出力 : 600 MeV/200 kW
- 陽子ビームサイズ (高さ方向) : 6 mm(2 σ), レーザービームサイズと同等
- レーザーマイクロパルス繰り返し : 13.6 MHz
- レーザーマクロパルス幅/繰り返し : 70 μ s/25 Hz
- レーザーマクロパルスエネルギー : 3.2 J
- マイクロパルスエネルギー : 2.3 mJ

(12) 式を用いて荷電変換効率 P を計算すると、P=14.5%となる。また、レーザーマイクロパルス周波数 2.7 MHz で、先の図 2 に示した陽子ビーム中間パルス中でレーザービームを照射を受ける陽子ビームマイクロパルス数を 128 発の中に 2 発に照射する場合、取り出される H⁰ ビーム出力は R = 459 W となる。レーザーのマクロパルス当りのエネルギーをパラメータとして計算した結果を表 3 に示す。

市販されている大強度のレーザーは 4 J/pulse 程度である。以上によりパルストレイン型 YAG レーザーを用いて陽子ビームのマイクロパルスとの間で 10 ps オーダの精度で同期照射を可能とすると、マイクロパルス周波数 2.7 MHz で 200~400 W の陽子ビームを取り出すことが可能と評価できる。

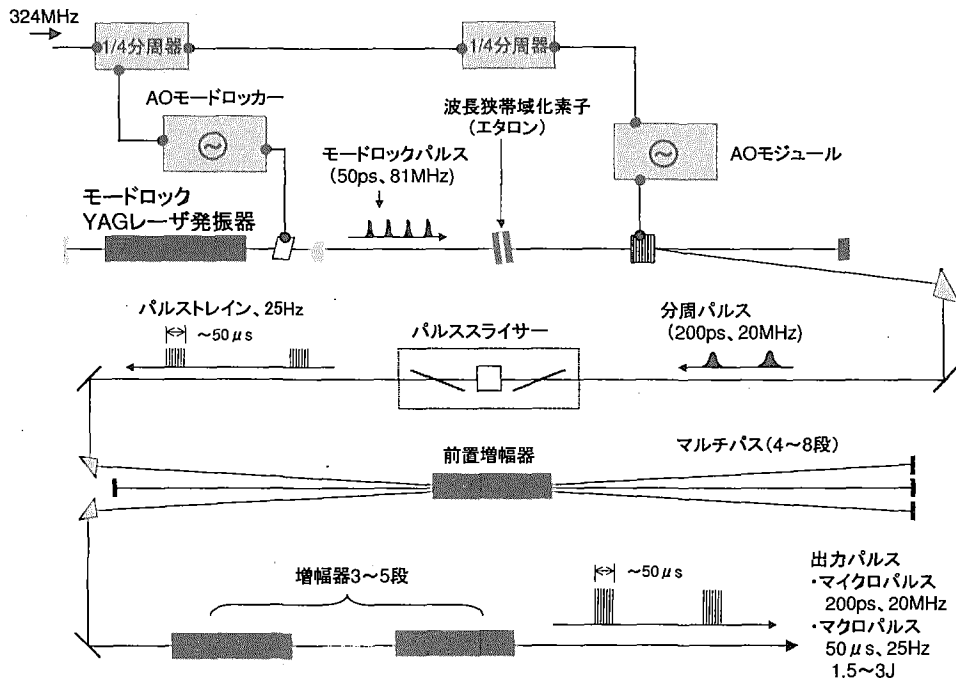


図 18: 数 100 W, 20 MHz ビーム取出し用レーザーシステムの構成

表 3: 数 100 W ビーム取出しのためのレーザービーム強度

レーザーマクロパルス エネルギー (J)	レーザーマイクロパルス エネルギー (mJ)	変換効率	取り出し陽子 ビーム強度 (W)
0.4	0.286	0.0192	57.4
0.8	0.573	0.0381	115
1.6	1.15	0.0748	230
3.2	2.29	0.145	459

4.5 加速器との同期

効率的なビーム取出しを行うためにレーザービームと H^- ビームの同期は重要となる。また、YAG ロッドを励起するランプ発光時間が $\sim 200 \mu s$ と長いのに対して、レーザーを照射する時間はこれに比べて短いため、同期は重要となる。特に短パルスのビームを取出す場合にはビーム出力が同期のずれにより急激に変化するために、同期が重要な問題となる。そこで、ここでは各レーザー発振器における同期システムに関して考察する。

4.5.1 Q スイッチ YAG レーザーの同期システム

図 19 に信号の遅延、同期のためのパルス信号制御系の構成を示す。ここでは 2 つの遅延発生器を使用し、1 つは、RFQ への入射信号と YAG レーザーランプ励起スタート信号間の遅延時間を制御するのに、もう 1 つは、レーザー照射点に到達した H^- ビームとレーザーのパルスの同期調整に使用する。両信号ともに 25~50 Hz の繰り返し周波数で供給される。信号のジッターを ps オーダに抑える時にはシンセサイザーを介して RF 基本周波数 (324 MHz) との同期をとることが必要となるが、これが ns オーダー程度で十分な場合には省略が可能と考えられる。

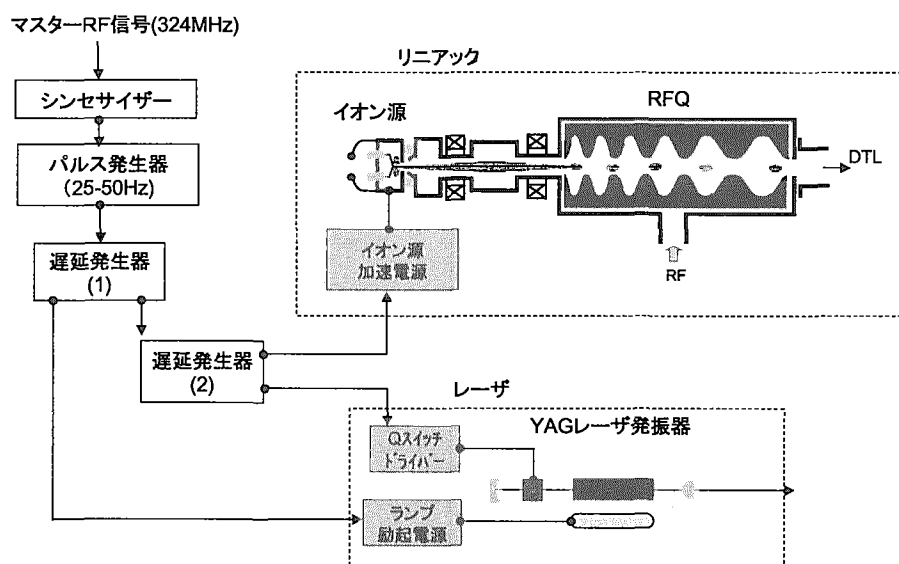


図 19: Q スイッチ YAG レーザーの同期システム

4.5.2 準 CW レーザーの同期システム

Q スイッチを備えず、 $\sim 500 \mu s$ の長パルス幅の発振モードで動作する準 CW 用の YAG レーザーの場合には、ランプの励起スタートと同時に発振パルスが発生する。従って、Q スイッチ場合の $200 \mu s$ におよぶ遅延時間を設定する必要はなくなるので、図 19 に示した遅延発生器 (1) を省いた単純な構成となる。

4.5.3 モードロックレーザーの同期システム

モードロックレーザーの同期システムを図 20 に示す。この場合には、Q スイッチ型のものに比べると複雑な構成となる。モードロック YAG レーザーの駆動は、加速器の RF 信号に同期した信号で行うことが必要となる。また、再生増幅器へのパルス入、EO スイッチもこの RF 信号に同期してつくられたパルス (25~50 Hz) で駆動する構成が必要となるため、シンセサイザーを介しての同期システム構成とすることが必要となる。

このタイプの同期システムは、モードロックレーザー光と電子ビームの衝突実験を行う場合に適用され、レーザー光と電子ビームパルス間のジッタをサブ ps オーダとしたものが SPring-8 で実用化されている [8]。

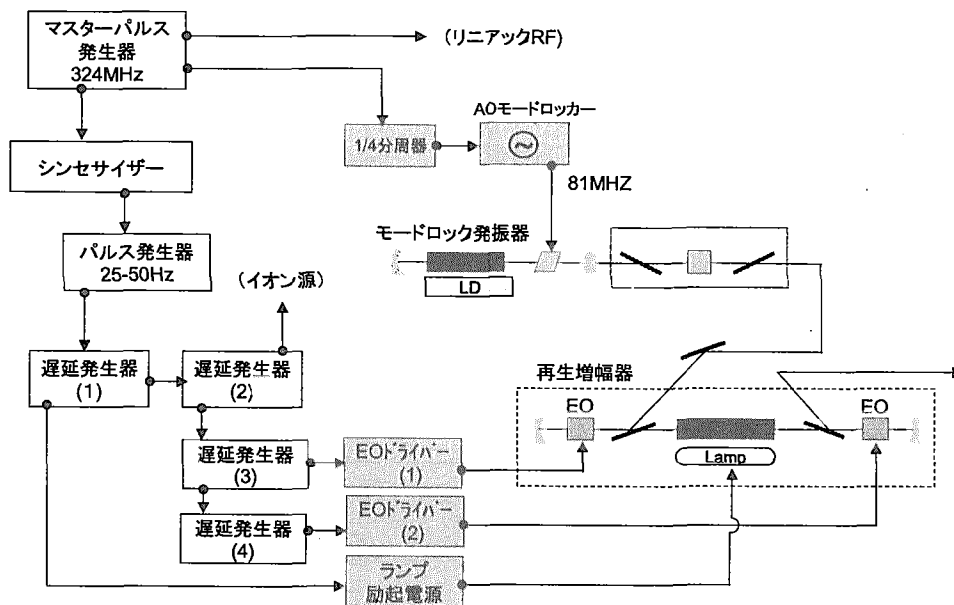


図 20: モードロックレーザーの同期システム

4.6 レーザー荷電変換器を直線状に配置した場合の問題点

レーザーを照射しなくとも H^- ビームが真空中の残留ガスとの相互作用により、荷電変換され核変換物理実験施設に入射する。この成分はバックグラウンド成分となるために望ましくない。ここでは、残留ガスとの相互作用により入射するビーム強度について検討する。

ADS へのビーム輸送ラインは、曲線部と直線部から成り立ち、曲線部の出口近傍にレーザー荷電変換部を設ける。曲線部における残留ガスによって荷電変換された中性化粒子は輸送ラインから大きく外れるために、真空ダクト中に再び戻ることはない。一方直線的な荷電変換部では、残留ガスとの相互作用で中性化された粒子はレーザーで変換されたものと区別なく、核変換物理実験施設に入射してしまう。

荷電変換部における真空と残留ガスとの相互作用で生じる H^0 および H^+ の出力を図 21 に示す。計算では、ガスの荷電変換断面積を 10^{-18}cm^2 とした。レーザー荷電変換部の長さを 3 m と仮定すると、真空が $5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ より悪くなると、残留ガスにより 10 W 程度のビームが取り出されて

しまうため、真空が悪い場合にビームを停止させるインターロックが不可欠となる。

このビームラインの上流側にある超伝導 LINAC の真空はほぼ 10^{-6} Pa に維持することを考えているので、この直線部の真空も 10^{-6} Pa 程度になると思われる。そのために、定常的に 20 mW のビームが流れ込む DC 成分のバックグラウンド成分がある。このために、核変換物理実験施設にビームを入射しない場合には、核変換物理実験施設の偏向マグネットの電源を切断し、ビームシャッター等を挿入する必要がある。定常的な 20 mW のバックグラウンドが実験上問題となる場合には、ポンプの数量を増やすことでさらに真空を 10^{-7} Pa 程度に改善し、直線部の長さを 1 m 程度に短くすることで、バックグラウンドを 0.6 mW 程度に下げることができる。しかしながら、一般的にパルス実験では、このようなバックグラウンドは望ましくはない。

なお、数 mW 程度の出力を望む場合には、レーザーによる荷電変換は必要なく真空を制御することで可能かもしれないが、真空の制御は一般的に難しく適切でないと考えられる。

そこで、上述の問題は解決するために、5章で偏向電磁石と一体化したレーザー荷電変換器について検討を行った。

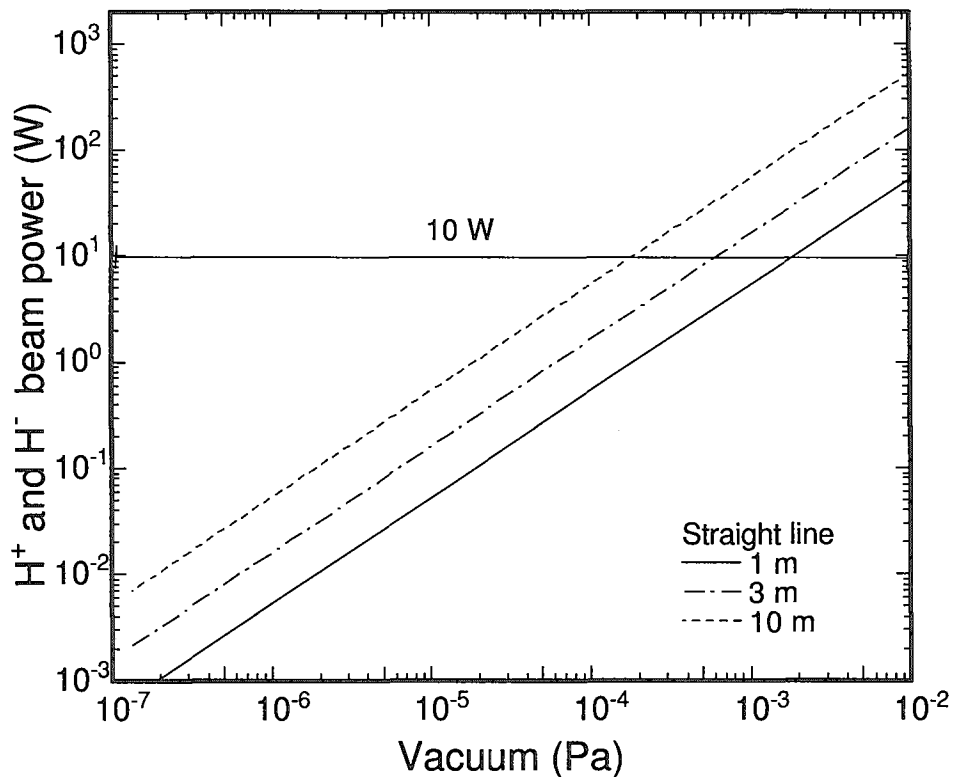


図 21: レーザー荷電変換部の真空度と変換粒子の出力の関係

4.7 真空悪化による H^+ ビームの増加

大強度陽子加速器計画の 3 GeV シンクロトロンでは荷電変換にストリップングフォイルを使用するが、フォイルが厚くなるにつれビームがほぼ 100% の効率で H^+ に変換されることが報告されている [7]。真空が悪化する場合にはビームの殆どが H^+ に変換されることが予想される。また、

荷電変換器で生じた H^0 イオンと一次ビームである H^- イオンを弁別するの偏向電磁石内において H^+ と H^0 イオンも弁別されることから、核変換物理実験施設には大強度のビームが入射しないことが期待できる。そこで、ここではこの定量的な評価として、荷電変換の実験データを基に、 H^- ビームと真空中の残留ガスとの相互作用で、荷電変換を行い核変換物理実験施設に入射するビーム出力について検討する。

反応前後の電荷を (i,j) とすると、 H^- イオンが物質中を通過する場合の荷電変換には、 $(-1,0)$, $(-1,1)$, $(0,1)$, $(0,-1)$, $(1,0)$, $(1,-1)$ の6種類がある。ここで、電子を捕獲する $(0,-1)$, $(1,-1)$ は極めて反応断面積が小さいので無視することができ、次式が成立する、

$$dn^-/dx = -(\sigma^{-10} + \sigma^{-11})n^-, \quad (18)$$

$$dn^0/dx = \sigma^{-10}n^- - \sigma^{01}n^0, \quad (19)$$

$$dn^+/dx = \sigma^{-11}n^- + \sigma^{01}n^0, \quad (20)$$

上式で n は各電荷状態の粒子数、 σ は荷電変換断面積、 x は媒質の厚さを示す。これらの式から

$$n^- = \exp[-(\sigma^{-10} + \sigma^{-11})x], \quad (21)$$

$$n^0 = \sigma^{-10}/(\sigma^{-10} + \sigma^{-11} - \sigma^{01})[\exp(-\sigma^{01}x) - \exp-(\sigma^{-10} + \sigma^{-11})x], \quad (22)$$

$$n^+ = 1 - n^- - n^0, \quad (23)$$

となる。

空気の断面積は炭素とほぼ同じであると仮定して、上式を用いて残留ガスによる H^0 ビームの出力を計算した。炭素の荷電変換断面積を図 22 に示す。なお、 σ^{-10} の断面積は $\sigma^{-10} + \sigma^{-11}$ の半分とした。図 23 に 200 kW 運転時における、真空度と残留ガスで変換された粒子の出力を示す。 H^0 , H^+ イオンともに 50 Pa 以下の場合には、圧力に比例し各イオンの出力は増加する。 H^+ イオンは 50 Pa で最大出力となり、これより圧力が高い場合にはガス内部で H^0 イオンに変換される。 H^0 イオンの最大出力は 50 kW となるのがわかる。従って、変換器の真空が悪い場合でも 50 kW 以上のビームは核変換工学実験施設に入射しないことがわかる。ただし、この出力は 10 W を大幅に上回っているために、真空に対するインターロックが必要である。

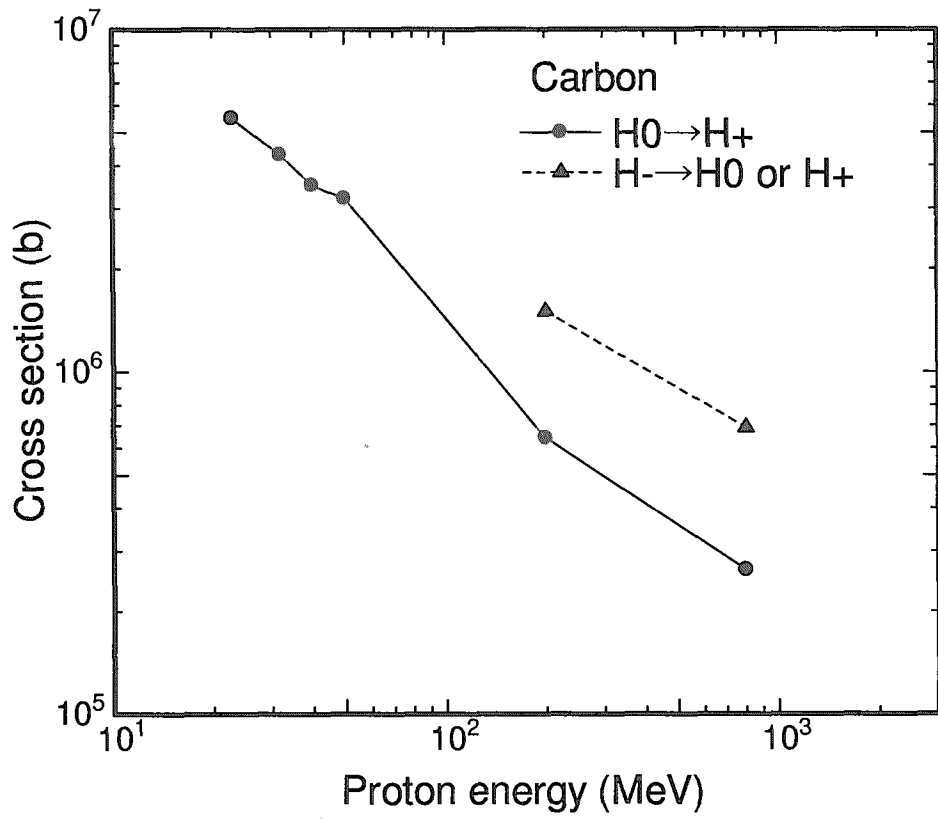


図 22: 炭素の荷電変換断面積

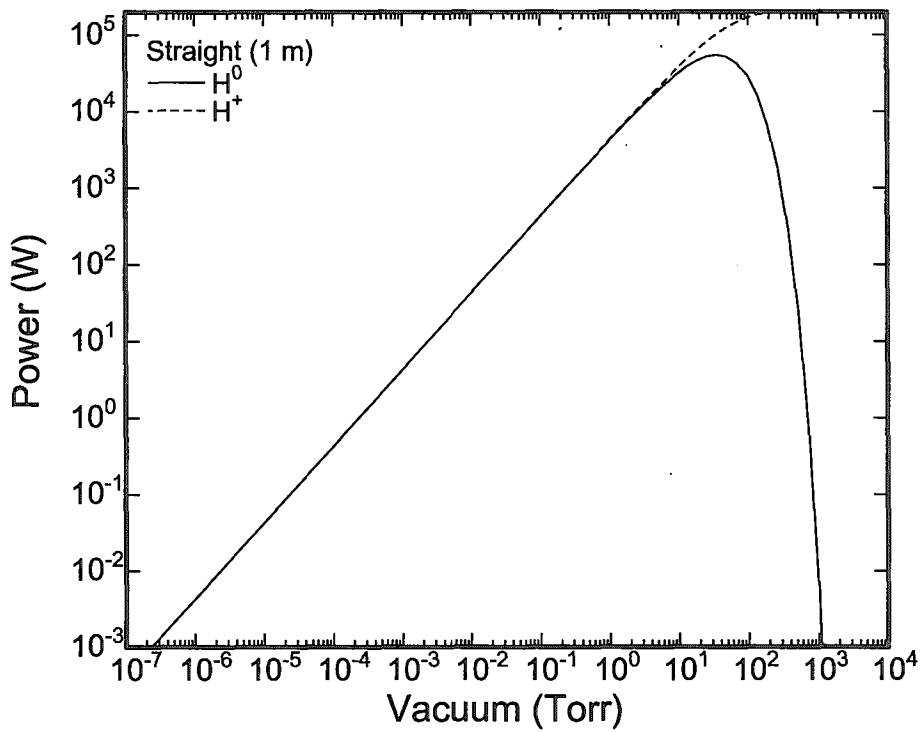


図 23: 真空と残留ガスとの相互作用で生じた H^0 , H^+ イオンの出力の関係

5 偏向電磁石と一体化したレーザー荷電変換器の検討

これまではレーザー変換器を直線輸送区間に設けることを検討してきたが、この方法では変換器の真空が悪化した場合に大量の電流が核変換物理に輸送される可能性やパルス取出しを用いる場合に DC 成分のバックグラウンドが存在する問題があることを示した。そこで偏向電磁石と一体化する方法を考案した。

5.1 概念

図 24 に偏向電磁石と一体化とする概念を示す。直線輸送区間にレーザー変換器を設置した場合では、直線部での残留ガスとの相互作用で生じた H^0 ビーム (区別するために $H^{0(*)}$ と標記) と変換器で生じた H^0 ビームを弁別することができないために、核変換物理実験施設に輸送される。そこで、レーザー荷電変換器を偏向電磁石内に設置する。これにより、 $H^{0(*)}$ は偏向電磁石を直進し、DC 成分のバックグラウンド成分を減少させることが可能である。 H^0 ビームとレーザービームの衝突点の H^0 ビーム進行方向に 10 mm 程度、真空を 10^{-6} Pa とすると、バックグラウンド成分は $60 \mu W$ となる。レーザー荷電変換により 10 W のビームを核変換物理実験施設に輸送する場合、S/N 比は 1.5×10^5 となりバックグラウンド成分を實際上問題の無いレベルまで小さくすることが可能である。

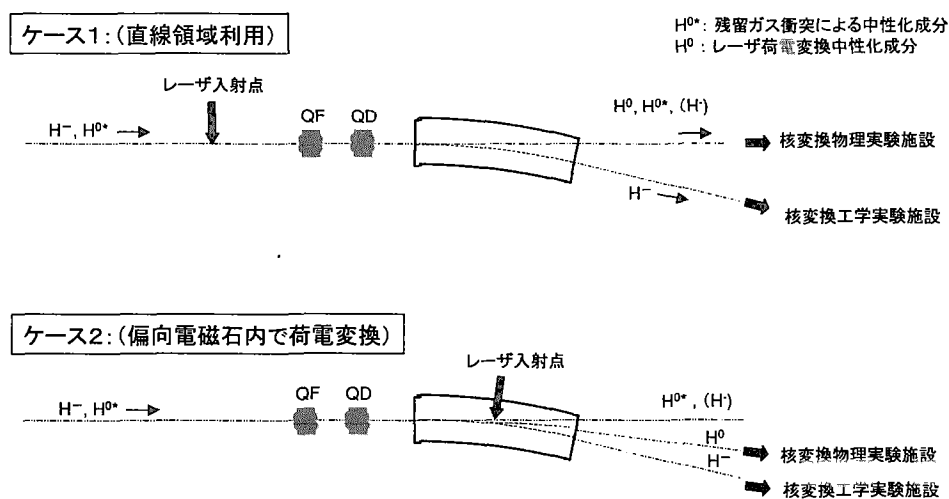


図 24: 偏向電磁石と一体化したレーザー荷電変換器の概念

5.2 偏向電磁石内に設置することによるビームの広がり

偏向電磁石内部ではビームの進行方向が連続的に変化するために、有限の幅を持つ荷電変換領域においてもビームの特性が連続的に変化する。よって偏向電磁石内部に設けることにより、 H^0 ビームの角度が広がりエミッタンスが増加する。これを図 25 に模式的に表す。ここではこの増加について検討を行う。

衝突点でのビーム条件は表 4 の通りである。表中のビームサイズについては実際の陽子ビーム

表 4: 衝突点でのビーム条件

ビームサイズ	3mm
エミッタンス	$1.1 \pi \text{ mm}\cdot\text{mrad}$
偏向角 α	12°
偏向半径 ρ_m (mm)	10994

オプティクスに依存するために、便宜上 3 mm と仮定した。

発散角の増大は $\Delta\theta = L_r / \rho_m$ (rad) である。ここで L_r は H^- ビームがレーザーを照射される長さである。レーザービームの形状が円形と仮定すると、 L_r はレーザービームの直径 (3 mm) と同一になる。よって、発散角の増大は $\Delta\theta = 0.27 \text{ mrad}$ となる。一方、 H^- ビームの発散角は 1.5 mrad 程度であるために、エミッタンスの増大は 20% 程度生じるものの、大きな増大とならないことがわかった。

なお以前の検討 [2] において、荷電変換器から核変換工学実験施設に輸送するビームラインは直線的に輸送するものを設計したが、荷電変換器を偏向電磁石に組み込むことにより、これを 6° 程度偏向させる必要が生じてきた。このビームオプティクスに関しては今後検討を有する。

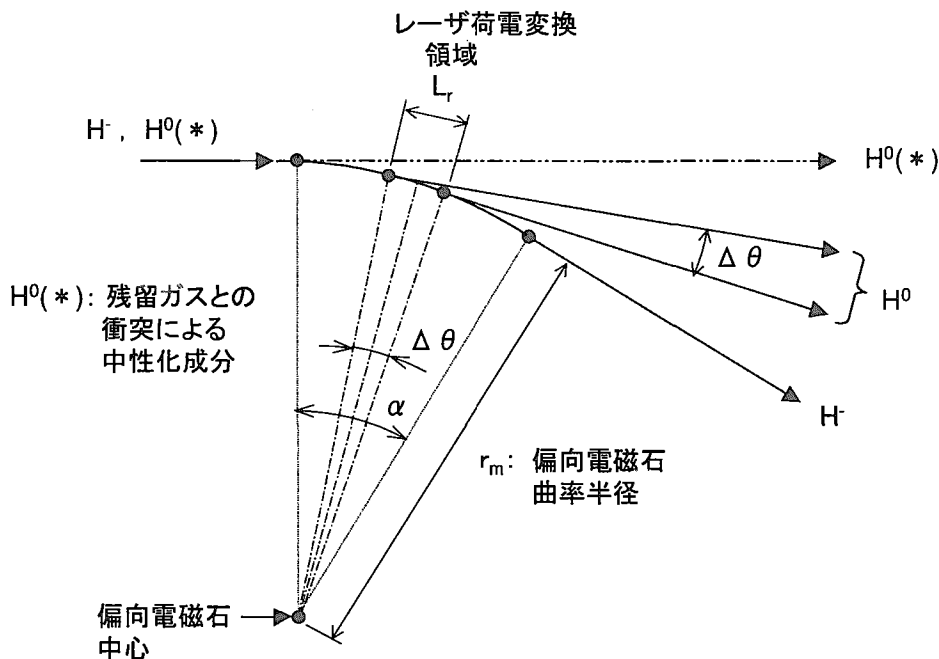


図 25: 偏向電磁石内に荷電変換器を設置する場合の角度の広がり $\Delta\theta$

6 レーザー伝送光学系の検討

レーザー機器は放射線損傷を防ぐ点から、陽子ビームトンネル内に設置することはできない。そこで、トンネル外部から荷電変換器までレーザー光を伝送するシステムが必要となる。ここではこのレーザー伝送光学系の検討を行う。

6.1 レーザー伝送光学系

レーザー発振器はレーザー機械室に配置される。この陽子ビームの輸送系も含めた全体的な配置を図 26 に示す。レーザー発振器からレーザー荷電変換器までの光路長は 20~30 m となり、この間はレーザー光輸送ダクトを通してレーザー光の輸送を行う。レーザー装置からレーザー荷電変換器までの伝送のシステムは図 27 に示すような構成となる。レーザー光の輸送ダクトは遮蔽用の土盛に埋め込まれるようになるが、放射線遮蔽の観点から少なくとも 2 回以上の屈曲を経て輸送する構成が必要と思われる。ここでは以上の条件を前提とし、レーザー光伝送光学系で考慮すべき項目について検討を行った。

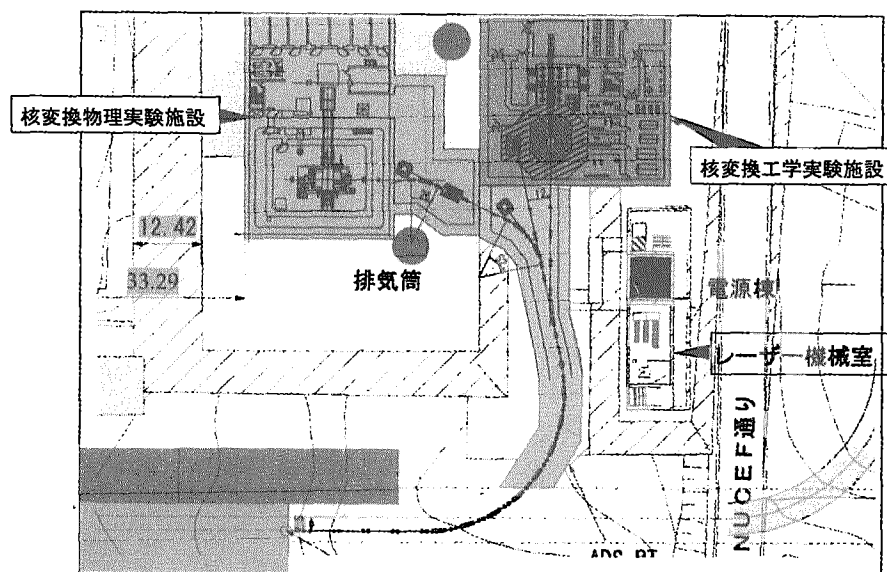


図 26: 核変換実験施設の配置

6.1.1 レーザー光の伝送効率

レーザー装置から出射した光は、モニター、制御用光学系、および伝送光学系を通して荷電変換器に輸送される。誘電体多層膜コーティングした反射ミラーの放射線に対する耐久性については詳細なデータが無いために、高放射線場であるトンネル内にはコーティングを施さないプリズムを用いる方式を適用した。この場合構成される光学素子の数量と伝送効率は表 5 のようになる。光学素子の反射および吸収による損失は、全体で約 70% と推定される。

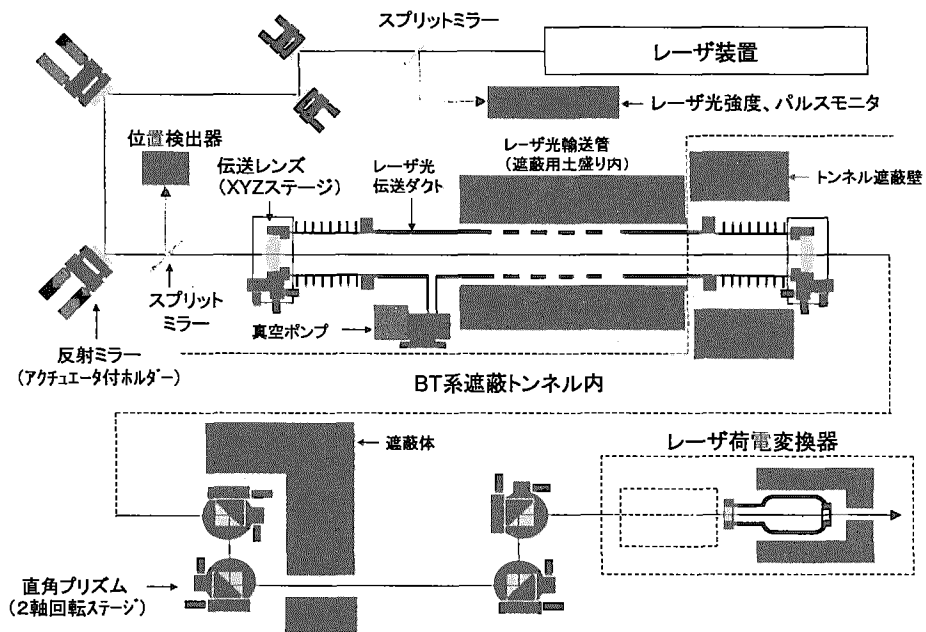


図 27: レーザー荷電変換器のレーザー光伝送系統の概念

表 5: レーザー光の伝送系の光学素子数量および伝送効率

品名	数量	伝送効率
前置アライメントミラー	2	$x(0.995)^2$
モニター用サンプリングミラー	2	$x(0.96)^2$
制御用光学系および反射ミラー	2	$x(0.995)^2$
伝送レンズまたは光学窓	2	$x(0.96)^2$
伝送ミラー (トンネル外部に設置)	2	$x(0.995)^2$
伝送用プリズム (トンネル内部に設置)	2	$x(0.96)^2$

6.1.2 光学検討

レーザービームを長距離に亘って伝送する場合には、空間強度分布に不均一性が生じ、レーザー光学素子の損傷を引き起こす原因となる。また、レーザービームの発散がレーザー光学系のアクセプタンスを超えるような伝送を行う場合には、ビーム径は光学素子の有効径を超えて拡大し、極端な伝送効率の劣化をもたらす事が想定される。そこで、レーザー伝送系に必要な光学系のパラメータの検討を行った。

レーザービームの条件をビーム直径を 10 mm 以下、品質を回析限界の 3 倍以下であると想定する。レーザー光の発散角 θ は [9, 10]

$$\theta = 5 \times (2.44\lambda/D) = 0.78 \text{ mrad} \quad (24)$$

となる。光学系によるレーザー光の径が制御できる範囲を $\Delta D = D$ とすると、ビームサイズの拡大を光学系で制御して伝送できる限界距離 (L) は、

$$L = D/\theta = 10(\text{mm}) / 0.78(\text{mrad}) = 12.8(\text{m}) \quad (25)$$

となる。従って、それ以上の距離で上記条件のレーザー光を伝送しようとする場合には、伝送距離の増加に応じて直径の大きな光学素子を使用することが必要となる。実際に伝送する距離は 20 m 程度に亘るために、25 式から逆算してレーザー輸送光学系には直径 24 mm 程度のものが必要であることがわかる。

レーザー光の伝送に伴うサイズ、プロファイルの変化に対応するためには、伝送レンズを使用した光学系の構成とするのが望ましい。その構成は、凸レンズ 2 枚を共焦点の位置に対向して配置するだけでよく、レーザー装置出射口から 1 枚目までのレンズまでの距離を L_1 、対向するレンズ間の距離を $2f$ (f は焦点距離)、2 枚目のレンズから対象点 (この場合はレーザー荷電変換器) までの距離を L_2 とおいたときには、結像の関係により、 $L_2 = 2f - L_1$ となる。この光学系を適用すれば、レーザー発振器出口におけるプロファイルをほぼ維持した状態でレーザー荷電変換点まで伝送することが可能となる。伝送レンズ間の焦点位置では、非常に高いレーザー密度となるため空気のブレイクダウン現象が生じるので、この間の伝送管中は真空とすることが必要となる。

6.1.3 レーザー光軸の安定性と制御機構

一般的な YAG レーザーなどの固体レーザー装置が保証しているレーザーの出射方向の安定性は、 $\sim 1\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 程度である。従って、レーザー光が直径 10 mm で 30 m の距離を伝送する場合の位置安定性は、 $1 (\text{mm}\cdot\text{mrad}) / (10\text{mm}) \times 30 (\text{m}) = \pm 3 \text{ mm}$ であり、レーザー光直径の 30% 程度の変動が生じることが予想される。また、レーザー装置本体だけでなく、光学機器を支持しているベンチ、ホルダー、その他構造物の温度変化による変動も加わるので、これらを補償するためのレーザー光軸制御系を備える必要がある。

レーザー光軸を安定に制御するためには、レーザー光の出射方向を精度良く測定し、アライメント用ミラーの調整機構にフィードバックすることが必要となる。レーザー光軸制御の概略を図 28 に示す。レーザー装置からの出射方向の変動のみを制御する場合には、同図中の (a) に示したように位置検出器 (2 点) でアライメント用ミラー (2 点) を支持するホルダーのアクチュエータをフィードバック制御する構成となる。この構成では、レーザー装置以外の光学支持機器の変動による影響を補正することができない。

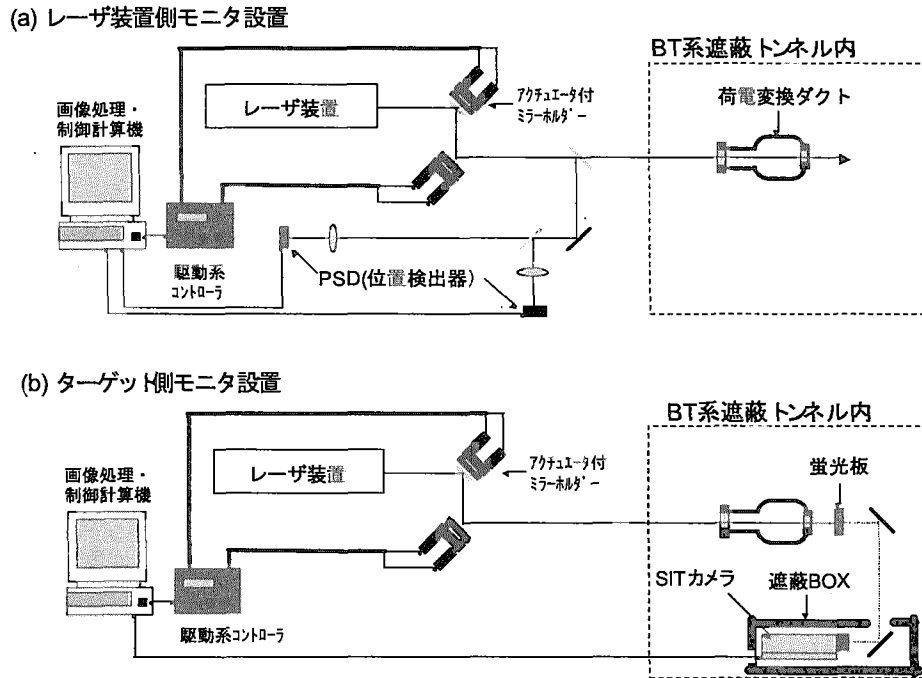


図 28: レーザー光軸制御機構の概略

同図中 (b) は、レーザー荷電変換器の透過光を蛍光ターゲットに当て、その画像をモニタカメラでとらえ、蛍光点が画像の中心に来るようにアライメント用ミラーの支持ホルダーのアクチュエータをフィードバック制御する構成としたものである。この構成では、最終ターゲットまでの光学系の変動を補正することができるので、(a) の場合に比べて確実性が高いと考えられる。しかしながら、レーザー装置の変動および輸送系途中の光学系の変動が大きい場合には追従が難しくなるので、(a) および (b) のシステムの併用が最も効果的な構成になるものと考えられる。

また、(b) の場合には加速器トンネル内にモニターカメラを設置することが必要である。このカメラには耐放射線性に優れ SIT カメラおよびビジコンカメラなどを用いる。トンネル内は 1 Gy/h 程度の線量と思われるが、市販の耐放射線性カメラでも 100 kGy を有し、10 万時間の使用が可能である。加速器は年間 5000 時間の運転を計画しているため、カメラは 20 年程度の放射線に対する寿命を持ち、実用上カメラの使用は問題ない。

6.2 レーザー入射光学系

レーザー荷電変換器まで輸送されたレーザー光は、陽子ビームのサイズに合わせてプロファイルを整形した後に、方向を調整するための入射光学系を通して陽子ビームに照射する。偏向電磁石内を荷電変換器のレーザー入・出射光学系の構成を図 29 に示す。レーザー光の整形光学系は、レーザービームの高さを陽子ビームのそれに合わせるための望遠鏡を備えており、これはビームの一方向サイズを変更できるように円筒レンズ（凹凸）2 枚で構成される。また、入射方向の調整は、直角プリズムを用いて反射角度を変更することによって行うことができる。この直角プリズムは、2 軸回転ステージ上に設置し、自動アライメント機構を付加し、照射条件を一定に維持するのに効果的な構成とすることも考えられる。

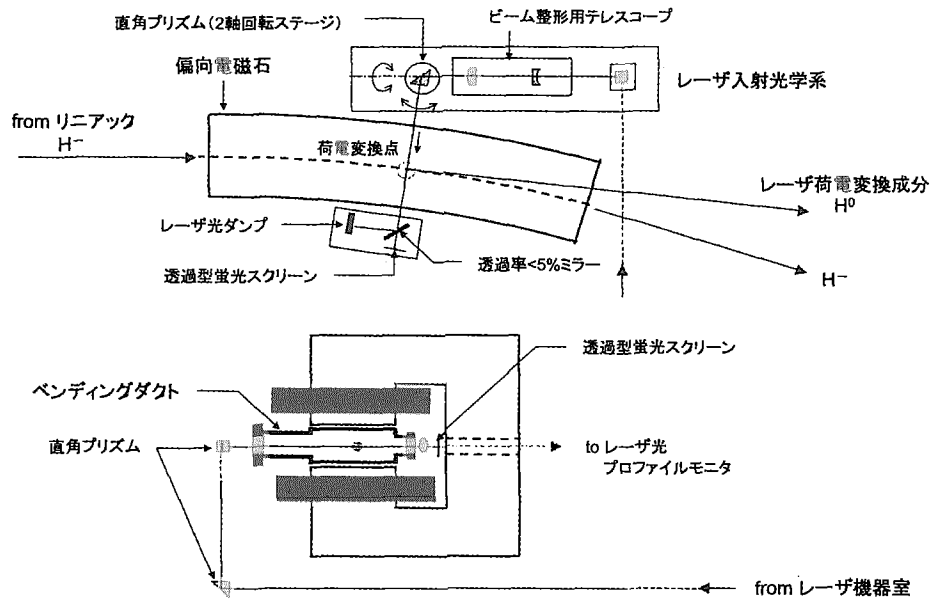


図 29: 荷電変換器へのレーザー入射光学系構成の概略

6.3 レーザー出射光学系

レーザー荷電変換器に入射したレーザー光をビームダクトなどの真空容器内表面で直接ダンプすると、構成表面が大きなエネルギーをもつフラグメントとして爆発的に飛散する現象であるアブレーションによって飛散し、荷電変換器内部の真空劣化を引き起こすことが考えられるため、アブレーションに関して検討した。高ピーク強度のレーザーを材料表面に入射したときに生じるアブレーションのしきい値は、ステンレス材の場合、ピーク密度で ~ 100 (MW/cm^2)となる。レーザー荷電変換システムで扱うレーザー入射強度が 2 J、断面サイズが $10\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ と想定すると、パルスエネルギー密度は 10 (J/cm^2)となる。また、光パルス幅を 20 ns となる場合には、ピーク密度は 500 (MW/cm^2)に達し、アブレーションが生じることになる。従って、この強度のレーザー光を真空容器内壁に直接照射することを避け、図 29 のように、窓を通してレーザー光をダクトの外に導いた後にダンピングすることでアブレーションを避けることができ、荷電変換器の真空の劣化を防ぐことができると考えられる。

また、荷電変換器を透過したレーザー光は反射ミラー (反射率 $\sim 99\%$) を使用し、 1% 程度に強度を弱めた後に蛍光板に入射し、そのプロファイルモニターカメラで見ることによりレーザービーム位置をモニターすることができる。

6.4 光学機器のコーティングと寿命

レーザー荷電変換システムで使用される光学素子は、反射光学系 (ミラー) と透過光学系 (レンズ、プリズム等) に大別できる。これらは光学基板上に専用のコーティングを施したものであり、入射レーザーの強度はこのコーティングの損傷しきい値によって制限される。

表 6 は、代表的な光学素子メーカーのカタログに記載されているコーティングを施した主な光学素子の損傷しきい値についてまとめたものである。損傷しきい値としては、高ピーク強度時に生じる

アブレーション的な破損と、時間平均的に高い強度に対して生じる熱的な破損に関わるものに分けられるが、本システムで扱われるような YAG レーザーの場合には、高ピーク強度時に生じるアブレーションによる破損が問題となる。レーザー光伝送光学系では、パルスエネルギー 2 J、ビーム直径 10 mm の YAG レーザービームを扱うことを想定すると、光学素子表面でのエネルギー密度は、 $2/(\pi \cdot 0.5^2) \sim 2.5$ (J/cm²) となり、表に示したしきい値以下となる。しかし、ビーム直径などの変更でこのしきい値に近い条件で使用する場合には、表面反射損失が若干増加し、さらに詳細な検討を要する。

表 6: 主要レーザー光学素子の損傷しきい値

光学素子	メーカー	損傷しきい値
全反射ミラー (0度または45度反射)	CVI	パルス 20 J/cm ² (幅 8 ns) 2.5 GW/cm ² (ピーク)
		CW 1 MW/cm ²
	メレスグレオ	パルス 8 J/cm ² (幅 1 ns) 8 GW/cm ² (ピーク)
		CW 500 W/cm ²
スプリットミラー	CVI	パルス 3 J/cm ² (幅 10 ns) 0.3 GW/cm ² (ピーク)
	メレスグレオ	パルス 6 J/cm ² (幅 1 ns) 6 GW/cm ² (ピーク)
透過ウィンドー	CVI(石英+ 無反射コート)	パルス 10 J/cm ² (幅 8 ns) 1.25 GW/cm ² (ピーク)
	メレスグレオ(BK7+ 無反射コート)	パルス 6 J/cm ² (幅 1 ns) 6 GW/cm ² (ピーク)

また、光学素子の寿命は、上記コーティングの損傷しきい値を守っていても短い期間で劣化し、使用できなくなるケースがある。それは下記の点に対する注意が不足している場合が多い。

1) ほこり、塵の多い環境下での使用

2) 高温多湿な環境下で使用せずに長期間保管したときに生じる表面のカビ

これらが主な要因となって損傷を引き起こす。従って、上記の2点のような問題を避けるために、光学素子は密閉 BOX、レーザー光はダクト中を伝送するような構成とする必要がある。

6.4.1 ビームの空間強度分布の不均一性

レーザー光を長距離伝送した場合には、その空間強度には次式のフレネル数 N を持つ歪み（リングング）を生じる。

$$N = a^2/\lambda \cdot (1/L_d + 1/R), \quad (26)$$

a : 出射部の開口半径

L_d : 伝送距離

R : 波面曲率半径

特にフレネル数 N が 1 桁のオーダーとなる場合には、そのピーク値は出射点での平均密度の 2~5

倍となる。このような高いピーク部分を受ける光学素子表面では、損傷しきい値を越えて損傷が発生することがある。

YAG レーザー ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$) の場合で、ビーム半径 $a=5 \text{ mm}$ 、波面半径 $R=\infty$ とすると、約 2.3 m 以上の伝送距離でフレネル数 N は 10 以下の数値となり、光学素子表面には高いピーク密度が生ずる。この点に関して十分な注意を払う必要があると思われる。

6.5 収束反射成分による影響

レーザー光学輸送系では、主にレンズの表裏面の反射により光学素子表面または内部に焦点を生じ、その部分での損傷が生じる可能性がある。また、この収束反射成分は、レーザー機器内部の重要な構成素子 (YAG ロッド、共振器ミラー、Q スイッチ用 EO 結晶等) に損傷を与えた場合には、発見が難しく、致命的な損傷に進展してしまうことが多いので特に注意が必要となる。これは、光学系の構成方法に依存するものであり、今後レーザー伝送光学系の設計に際して十分注意を払うことによって防止できるものと考えられる。

また、光学素子の寿命に関わる因子としては放射線による損傷があげられる。光学材料に関する放射線損傷は主にカラーセンターの発生による透明度の劣化として知られている。近年、最も一般的な光学材料である石英に関して耐放射線性を高くするためのドーパ元素の効果に関する研究成果が報告されており [11]、今後の耐放射線性に優れた専用の光学素子が出回ってくるのが期待できる。一方、コーティングに関する耐放射線性については報告例が少なく、今後のデータの蓄積を待つか、高放射線場ではコーティングした光学機器を使わない選択が必要であると考えられる。

7 レーザー制御系の検討

7.1 レーザー制御系の応答速度

核変換物理実験施設の実験では実験の種類により上限とするビーム強度が異なると考えられる。このために、実験毎にレーザー光強度の調整を行う。この上限は未臨界体系としての施設の安全性から要求される。このために、必要とされる以上のレーザービームは生ずることはないが、万一に何らかの要因で想定以上のレーザー光が発生する場合には即時にレーザー発振を停止させる必要がある。このために応答速度が速い制御を必要とされる。ここでは、レーザー制御系の応答速度に関して検討を行う。

パルス YAG レーザーの場合、レーザー発振器から出射される発振パルスを遮断すればレーザー出射を停止させることが可能である。Q スイッチを利用した場合には、Q スイッチをトリガー信号を遮断することにより即座 ($\leq 1 \mu\text{s}$) に停止させることが可能である。パルス毎にレーザー光の強度およびパルスをモニターして、遮断信号を制御系に送るためには、レーザー光診断系にも応答性の優れたものを選定する必要がある。レーザー光の強度測定には一般的にレーザーカロリメータが使用されるが、ms 程度の応答時間が長いために使用することができない。よって、早い応答速度を持つ光電子増倍管やフォトダイオードなどをレーザー診断系として採用する。図 30 にこの構成を示す。レーザー光の絶対強度を光電子増倍管やフォトダイオードを用いて精度よく測定するのが難しいので、補助的にカロリメータを用いて較正を行えるようにしている。

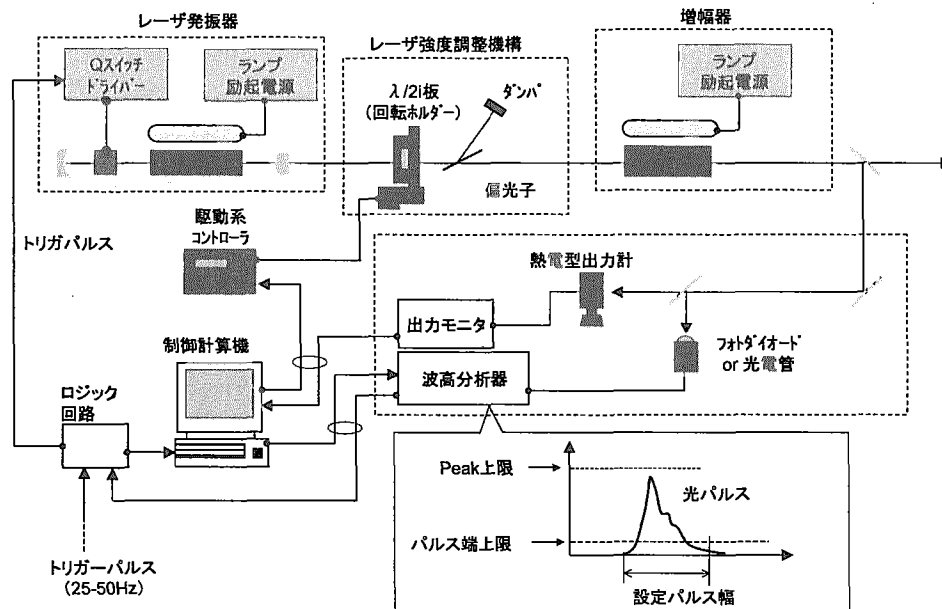


図 30: レーザー光モニターおよび出力制御系の構成

光電子増倍管やフォトダイオードのセンサーからレーザーパルスのピーク強度のみならず、パルス幅の測定も可能である。制御では、これらに上限値を設定し判別する回路を設ける。この判別回路からロジック回路を経て、次にレーザーパルスの出射を許可する信号を作る。さらに、この信号を受けてQ スイッチドライバーにより次パルスの発光を行う。これらのシステムの応答時間は下記のようになる。

光センサー応答時間	$\leq 1 \mu\text{s}$
判別回路応答時間	$\leq 5 \mu\text{s}$
ロジック回路応答時間	$\leq 1 \mu\text{s}$
Qスイッチドライバー	$\leq 1 \mu\text{s}$

全体の信号伝送系での遅延時間は $10\mu\text{s}$ 以下となる。次のパルスが来る時間は 25 Hz の場合には 40ms であるために、何らかの要因によりレーザーパルスの強度および発光時間が上限値を超える場合が生じた場合に、次の入射パルスを瞬時に停止することは十分可能である。

7.2 レーザー光強度の安定性制御

レーザー光は安定した強度で荷電変換器に供給する必要がある。このために必要な制御システムについて検討を行った。

パルス YAG レーザーの場合には、YAG ロッドの熱的条件を定常状態としてロッド内の屈折率分布等の光学的な条件を一定に保ちながらレーザー光の発振モードが最適となるように補正を行う必要がある。このために、ロッドを励起するランプの強度を一定に保つ必要があり、励起ランプの強度を変化させることによりレーザー光強度を調整することは不可能である。一般的には YAG レーザーの出力調整は Q スwitch のタイミングを変化させることによって行われるが、この方法ではレーザー光強度のみならず光パルス幅も変化させてしまうために、取出される陽子ビーム強度がレーザー光強度に比例しなくなる。よって、ここでは偏光子を用いてレーザー光強度を調整する方法を検討した。

レーザー光強度調整法は発振器からの出射強度を、図 30 に示した波長板 ($\lambda/2$ 板) を用いて調整する。本手法ではパルス幅を一定に保ちながら強度を調整することが可能である。操作原理は、波長板を回転させることによりレーザー発振器からの出射ビームの偏光角度を調整し、偏光子を通過する強度を調整する。波長板ホルダーに回転モータを取り付け、モニター系からの信号をフィードバックすることによりレーザー光強度を一定に保つ制御が可能となる。ただし波長板の回転角度 θ に対して、レーザー光強度は $\cos\theta$ 分布の振る舞いを示すため、波長板ホルダーの回転角とレーザー光強度は直線性を示さないことに関して注意する必要がある。強度調整のダイナミックレンジはレーザー発振器から出射する光の直線偏光度に依存する。一般的には $\sim 99\%$ の直線偏光度を有するため、本手法により 2桁程度のダイナミックレンジを確保できると考えられる。よって最大取出し強度を 10 W とする場合には、制御可能な最小の取出し強度を 100 mW である。

核変換物理実験施設で行われる実験に依っては、100 mW 以下の弱い陽子ビームを制御した状態で供給する必要がある。この場合には、光減衰フィルターを偏光子・荷電変換器間に挿入することにより制御されたレーザー光を用いることが可能となり、100 mW 以下の強度のビームも安定して荷電変換器に供給できる。

8 レーザー機器に必要なユーティリティー

レーザー機器で必要とされるユーティリティーの検討を行った。図 31 にレーザー機械室のレイアウトを示す。レーザー機器の健全性を保つためにクリーンルームが必要である。このために、エアシャワーを備え付ける必要がある。また、機器の組立ておよびメンテナンス作業もクリーンな空間が必要とされるためにクリーンルームで行う必要がある。さらにレーザー機器を設置する室内には温度・湿度の管理ができる空調機が必要とされる。

図 32 にレーザー機器の設置案を示す。レーザーコンポーネントを配置する光学ベンチはユニット化し、1ユニットを必要な数量だけ直列に接続する。レーザー発振器は振動を防ぐために光学定盤上に設置し、遮光性能を有する保護カバーおよび局所空調機を設置し、レーザー機器から埃や塵等から守ることが必要である。AC配線は天井にラダーを配置してレーザー電源まで敷設し、冷却水は光学ベンチ下の集合配管を利用して供給する形式とすることで、作業スペースを有効に利用することができる。

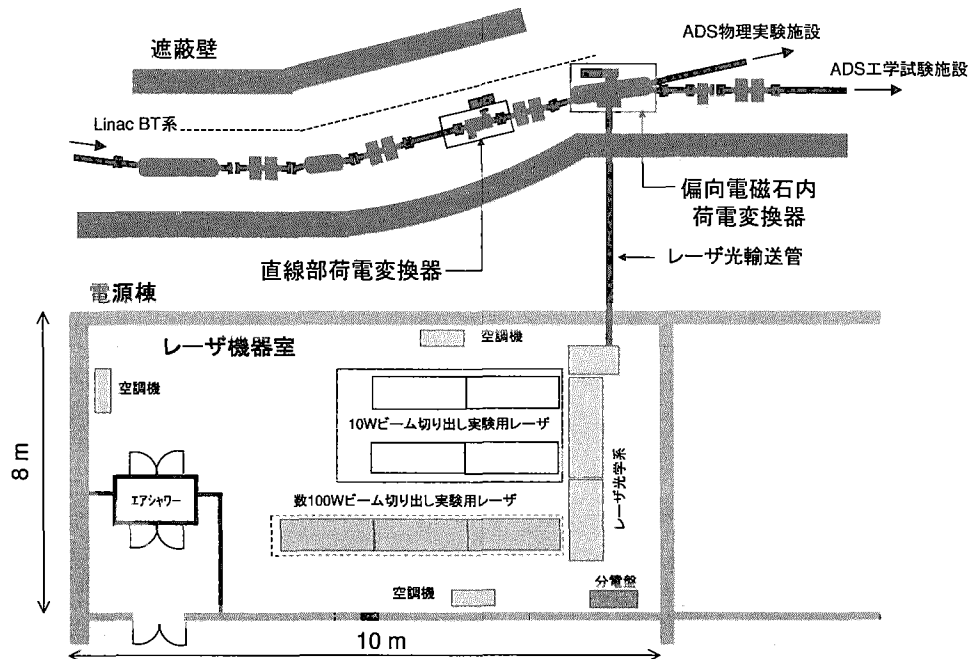


図 31: レーザー機械室の構成

YAG レーザー装置には、電源および YAG ロッドからの発熱を循環冷却水で除去する機構を必要とする。冷却水のシステムを図 33 に示す。YAG ロッドの冷却水には、励起ランプと YAG ロッドの間の空間に循環してロッドの熱を除去するため、水質を管理しなければ Ca 等の不純物の付着により励起効率が著しく低下する恐れがある。このために、YAG ロッドユニットには常に純水を循環し、熱交換器を行う冷却水ユニットが必要となる。純粋の流量および 1 次冷却水の流量は共に 100 l/min 程度必要である。また、レーザー機器室にはパッケージ化された純水冷却機を用いる。

レーザー装置の運転および制御は、基本的にレーザー機器室内で行うことを想定しているが、施設全体に LAN を導入しておけば、制御室への必要なデータの伝送および連絡が可能となる。

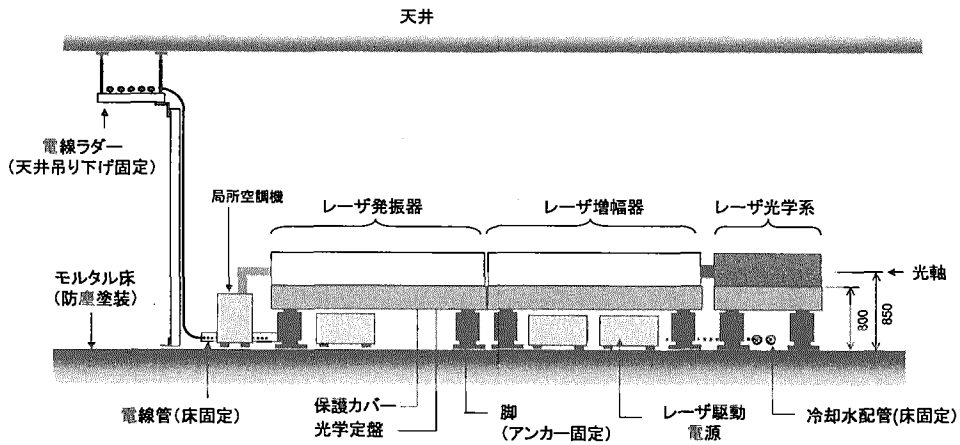


図 32: レーザー機器の構成及び設置案

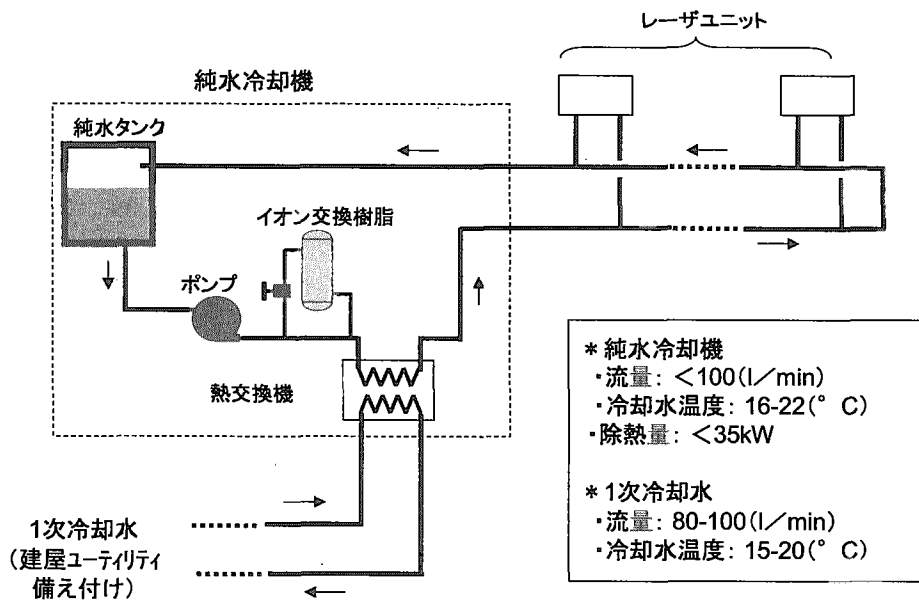


図 33: レーザー機器の冷却水の系統

9 結語

原研・KEKの大強度陽子加速器統合計画における核変換技術の確立を目指した核変換物理実験施設へのビーム取出し法の技術的検討を行った。核変換物理実験施設で必要とされる10 W程度のビームの取出しでは検討を行ったところ、パルス幅20 ns、パルス出力2 Jおよび繰り返し25 HzのYAGレーザーを用いることで十分可能であることがわかった。この検討結果は、核変換物理実験施設のビーム入射系の設計に反映させる。

謝辞

本報告書の作成にあたり、内容を詳細に吟味して戴くと共に貴重なコメントを戴いた加速器グループの小栗 英知氏に感謝いたします。また、核変換物理実験室のビームラインの検討に際し幅広い支援を戴いた、横溝 英明大強度陽子加速器施設開発センター長に感謝いたします。

参考文献

- [1] 日本原子力研究所・高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム, “大強度陽子加速器計画”, JAERI-Tech 2000-003 (2000).
- [2] 大井川 宏之, 池田 裕二郎, 佐々 敏信, 明午 伸一郎, 高野 秀樹, 辻本 和文, 西原 健司, “核変換実験施設の概念検討 (1) 核変換物理実験施設の概要”, JAERI-Tech 2000-062 (2000).
- [3] 大井川 宏之, 前川 藤夫, 明午 伸一郎, 春日井 好己, 辻本 和文, 西原 健司, 佐々 敏信, 今野 力, 甲斐 哲也, 池田 裕二郎 “核変換実験施設の概念検討 (3) 核変換物理実験施設の概要”, JAERI-Tech 2002-037 (2000).
- [4] T. Sasa, K. Kikuchi, H. Oigawa and Y. Ikeda “A Conceptual Study on a Material Irradiation Experimental Facility with a Lead-Bismuth Spallation Target for the Accelerator-Driven System Development”, Proc. International Collaboration on Advanced Neutron Sources, ICANS-XV, Tsukuba, 6-9 Nov. 2000, JAERI-Conf 2001-002pp. 1163-1174 (2001)
- [5] 西原 健司, 佐々 敏信 “加速器核変換システム用核破砕ターゲットからの核破砕生成物の放射能と毒性評価” JAERI-Research 2001-015 (2001).
- [6] R. C. Connolly, et al., *Nucl. Instr and Meth A* **312**, 415 (1992).
- [7] 中性子科学研究センター, “中性子科学研究計画における研究開発”, JAERI-Tech 99-031 (1999).
- [8] Y. Tanaka, T. Hara, H. Kitamura and T. Ishikawa, “Timing control of an Intense Picosecond Pulse Laser to the SPring-8 Synchrotron Radiation Pulses”, *Rev. Sci. Instr.* **71**, 1268 (2000).
- [9] A. E. Siegman, “An Introduction to Laser and Masers”, New York McGraw-Hill Book Company (1971).
- [10] S. Park, et al., “Refractive Sapphire Microlenses Fabricated by Chlorine-based Inductively Coupled Plasma Etching”, *Applied. Optics*, **40**, 3698 (2001).
- [11] 長谷川 宏, 高橋 宏, 速水 弘之, 山田 明考, “光ファイバの最新応用技術”, エヌ・ティー・エス社 (2001).

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	
光照射度	ルーメン	lm	cd·sr
放射線量	ルクス	lx	lm/m ²
放射線当量	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
バル	bar
ガール	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	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, 1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- 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

YAGレーザーを用いたHビーム取出し法の概念検討

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。