

話 題

J-PARC RCS の 3-GeV Compressor への転換と
レーザーストリッピングの導入

山根 功*

Conversion of J-PARC RCS to 3-GeV Compressor with Laser Stripping Injection

Isao YAMANE*

Abstract

In order to remove problems induced by serious accelerator activation around the stripping foil, J-PARC RCS should be converted to a 3-GeV compressor ring, installing laser stripping. Activation due to nuclear scattering by stripping foil seems to be as serious as anticipated at the MW beam power level. As the beam loss due to nuclear scattering is unavoidable, foil stripping should be replaced to laser stripping at the most fruitful injection energy of H^- beam that is 3-GeV, upgrading the linac energy.

1. はじめに

昨年行われた INTDS 2014 での報告によると、J-PARC RCS では入射エネルギーを 181 MeV から 400 MeV に増加しビーム強度 1 MW を達成したが、これに伴い入射点の放射化も予想通り増加しているということである。また担当者によると、「レーザーストリッピング入射の可能性も検討している」とのことである。私がレーザーストリッピングの研究を始めたのは、ビーム強度が MW レベルになるとフォイルによるビームロスで加速器の放射化が問題となることを懸念したからであった^{1, 2)}。400 MeV 入射での入射点放射化の状況は私が当時予想した状況に近く、フォイルを使用する限りこの程度（以上？）の放射化は避けられないであろうと思われる。

ではレーザーストリッピング入射への転換はどうかというと、入射エネルギー 400 MeV では適用できるレーザー波長は 250 nm より短くなる。このレーザーの 1 mJ 程度のパルスを 324 MHz の繰り返しで供給しなければならない。これだけでも大変であるが、更にこの波長の光子エネルギーは高くミラーの損傷が懸念されるのである。

このようなことから 400 MeV でのレーザーストリッピングの RCS 加速器への実装は困難と考えられるのである。

一方、J-PARC RCS は 3 GeV までの H^- ビームは受け入れられると考えられる。3 GeV であれば、適用可能なレーザー波長は、440 ~ 860 nm と広がり、レーザーの選択肢が大幅に広がる。また、このレーザーパルスを 324 MHz の繰り返しで供給することは、レーザー蓄積リングにより可能であると考えられる。RCS を 3 GeV Compressor に転換しレーザーストリッピングを導入するのであれば、ユーザーにとっても現在の出力ビーム利用方法を変更する必要はない。そればかりでなく、むしろ新しい利用法の可能性が広がると思われる。それは、入射エネルギーが上がり空間電荷効果によるビーム強度限界が上がって、出力ビーム強度は 25 Hz で 5 MW 程度にはなると考えられるからである。

このように、リニアックのエネルギーを 3 GeV に増強し、RCS を 3 GeV Compressor に転換してレーザーストリッピングを導入することが入射点放射化の問題を解決する最良の方策であろうと考えられるのである……。

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
高エネルギー加速器研究機構 名誉教授
(E-mail: ikyamane@msd.biglobe.ne.jp)

このようなことを思っているだけではしょうがないので、公表して多くの方々のご意見を伺い議論したいと考えたのである。

2. 何をすべきか

RCS 入射点放射化により惹起されたストリッピングフォイル交換や入射点維持保守に伴う困難や作業員の放射線被曝の問題を解消し、合わせて陽子加速器のビーム出力を増強する方策として次の3点を実施すべきである。

- (1) 入射リニアックを 3 GeV に増強する。
- (2) RCS リングを 3 GeV Compressor へ転換する。
- (3) 3 GeV H^- ビームの入射方法をレーザーストリッピングとする。

3. フォイルストリッピングでのフォイル周辺の放射化

高エネルギー H^- ビームが炭素フォイルを通過した後の荷電分布 ($N^n : H^n$ の割合, n は $-1, 0, +1$) は、変換断面積を用いて連立微分方程式を解くことにより計算できる³⁾。400 MeV H^- ビームが $340 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素フォイルを通過する時には、 $N^{-1} = 8.4 \times 10^{-12}$, $N^0 = 6.8 \times 10^{-4}$, $N^{+1} = 0.9993$ が得られる。したがって、 H^- ビームは完全にストリッピングされ陽子ビームに変換するが、極一部 H^0 のまま残る。 H^0 の量は少ないのであるが、この数倍の部分が H^0 の励起状態に残されると考えられる。この部分は下流の磁場に入ると励起状態の寿命に応じて短時間真っ直ぐ飛び、その後 Lorentz 電場でストリッピングされハローとなる。 H^- ビームの強度が 133 kW (3 GeV まで加速されると 1 MW) であると、この部分の量は数百 W となる。このハローの一部は加速器のアパーチャーが狭くなるところでロスとなり放射化する。しかしこのロスは加速器に適切にコリメーターを設置することにより、害の無いように取り除くことができる。

問題はビーム中の高エネルギー陽子がフォイル中の炭素の原子核に散乱されて大きな角度で周りに飛び散ることや原子核と反応して中性子を発生することである。飛び散った陽子は周辺機器の材料と核反応し放射化を引き起こす。特に H^- ビームのエネルギーが 120 MeV 程度以上では発生す

る中性子の量がエネルギーとともに急速に多くなる。この中性子は周辺の真空容器などで何度も散乱され低エネルギーとなって吸収され放射化を起こす。陽子ビームは最初 H^- ビームとして炭素フォイルに入射し形成されるが、加速器リング軌道に乗った後もベータートロン振動をしながら周回し炭素フォイルの位置に戻ってくる。ペインティングでビーム中心はフォイルから少しずつ離れてゆくが、周回ビームの一部はフォイルを通過する。 H^- ビーム入射時間の最後に入った陽子は一回しかフォイルをヒットしないが、最初に入った陽子は何度もヒットする。入射ビームの平均ヒット回数はペインティングの条件などにより変わるが、大体数十回となる。この陽子ビームの原子核散乱によるビームロスの割合は、ざっと見積もっても $\sim 2 \times 10^{-4}$ 程度 (ビーム強度 133 kW では数十 W) になる。このロスは不可避であり、しかもフォイルの周辺を放射化する。

最近の J-PARC RCS の入射点放射化の様子はこの原子核散乱による放射化の描像に良く合っているように思える。この原子核散乱による放射化は入射ビーム強度が増加すれば当然増加するが、入射エネルギーを高くするともっと急速に増加すると思われる。現在の放射化のレベルでも、フォイルや入射点の維持保守には多くの被曝防止の機器を駆使しており、フォイルや入射点の機器に接近しての細かいところに手の届くような維持保守作業は不可能であると思われる。

4. レーザーストリッピングの可能性とレーザー蓄積リング開発の現状

H^- ビームの荷電変換は陽子に結合している二つの電子を剥ぎ取ることであり、光や電磁場を使っても可能であると考えられる。その方法をあれこれと調べて、次のような 3 step の方法に到達した。

1st step : $H^- \rightarrow H^0$ (Lorentz Stripping)

2nd step : $H^0 + \gamma \rightarrow H^{0*}$ (Laser Excitation)

3rd step : $H^{0*} \rightarrow p + e$ (Lorentz Stripping)

1st step は結合エネルギー 0.755 eV で緩く水素原子に結合している電子を、高速荷電粒子が磁場を通過する時受ける Lorentz 電場で剥離する。この Lorentz stripping は Los Alamos 800 MeV PSR でしばらく 800 MeV H^- の荷電変換入射に

使われたことがかなり良く分っている. 2nd step は H^0 をレーザービームにより励起状態に励起する. 目標の励起状態は, H^0 の速度と使用可能な磁場とで発生できる Lorentz 電場でstripping可能な励起状態である. 数百 MeV から 3 GeV 程度の H^0 ビームの場合, 使用可能な磁場を数 kG から 1 T 程度として目標の励起状態は $n = 3$ (水素原子の主量子数) の状態となる. 3rd step は 1st step と同様の Lorentz stripping である.

問題は H^0 ビームの momentum spread により H^0 の静止系でレーザービームの波長分布が広がることである. このため H^0 ビームが見るレーザービームの波長の拡がり $\Delta\omega = \omega\gamma\beta(\beta + \cos\alpha)$ ($\Delta p/p$) となる. α は H^0 ビームがレーザービームと衝突する角度である. $\Delta p/p$ は $\sim 10^{-3}$ 程度であるので, この拡がり $\Delta\omega \approx 10^{13}$ Hz 程度となる. これは通常のレーザービームではカバーできないのでこれをカバーするための何かの対策が必要である. また, これに伴い必要なレーザーパワーが大幅に増える. この問題への対策として, 二つの方法が提案されその検証実験が行われた. 一つは Level Broadening method で, KEK と BNL で実験された. もう一つは Frequency Sweep method で, SNS で実験された. ここでは Level Broadening method について説明する.

Level Broadening method では 2nd step と 3rd step とを分離しないで行う. 高速の H^0 ビームが磁場の中を通過する時, Lorentz 電場の Stark 効果によりその励起状態のレベル幅が広がる. このことを応用し, H^0 ビーム momentum spread によるレーザービームの波長分布の広がりをカバーするように中間励起状態 (H^{0*}) のレベル幅を拡げると, そのレベルの寿命は 3rd step での要請と同じ程度になるので, 励起された H^{0*} は直後に短時間で陽子と電子に崩壊する. このことは Los Alamos の実験で確かめられている⁴⁾.

H^0 の基底状態を $n = 3$ の Stark 状態に励起するため必要な光子の波長 (λ_0) は H^0 の静止系で 105 nm となる. H^0 の速度が βc の時, 実験室系での光子の波長を λ とし, H^0 ビームとレーザービームとの衝突角を α とすると, Doppler 効果により $\lambda = \lambda_0\gamma(1 + \beta\cos\alpha)$ となる. これより使

えるレーザービームの波長は, H^0 ビームエネルギーが 400 MeV の時 $\lambda \leq 256$ nm, 1 GeV の時 $\lambda \leq 406$ nm, 3 GeV の時 $\lambda \leq 868$ nm となる. したがって, 400 MeV では使用可能なレーザーの波長は短くエネルギーはその分高い. このようなレーザーパルス 324 MHz で供給することは非常に困難であり, たぶん不可能であろうと思われる. 1 GeV でも使用できるレーザーの選択肢は非常に限定される. これに比べ, 3 GeV では赤外から紫外光までの広い範囲のレーザーが使用可能であり, 選択肢は非常に広い. 必要なレーザービーム強度は, 1 GeV H^0 で $\lambda = 355$ nm の場合一つのマイクロバンチを励起するために $840 \mu\text{J}$ のレーザーパルスが必要であり, 3 GeV では $\lambda = 533$ nm の時 $800 \mu\text{J}$ のレーザーパルスが必要となる. しかもこのレーザーパルスを 324 MHz で供給する必要がある.

このようなレーザービームを発生する装置として, レーザー蓄積リングの開発が進んでいる. この装置については参考文献 5) で詳しく紹介したが, 現在完成までもう少しのところまで開発が進んでいる. このリングは 2 個のトロイダルミラーと 2 個の平面ミラーで構成するリング共振器内にレーザービーム増幅媒体と衝突点を装備したものである. 増幅媒体で増幅したビームはリングから取り出さずリング内で H^0 ビームなどと衝突させる. H^0 ビームなどとの衝突で失われるレーザービームは極めて少なく, レーザービームの形状も殆ど変化しないと考えられる. リング内ビームのロス λ は極めて少なく抑えられ, ミラーや増幅媒体を通過する時失われる分は増幅によって補われるので, ビーム強度は非常に高くなることが期待される.

参考文献

- 1) I. Yamane, PRST-AB, 1, 053501 (1998).
- 2) 山根 功, 「加速器」 Vol. 6, No. 2, 2009 (139-148).
- 3) R. C. Webber and C. Hojvat, IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol. NS-26, No. 3, (1979) p4012.
- 4) T. Bergeman, C. Harvey, K. B. Butterfield, H. C. Bryant, D. A. Clark, P. A. M. Gram, D. MacArthur, M. Davis, J. B. Donahue, J. Dayton, W. W. Smith, Phys. Rev. Letters, Vol. 53, No. 8, (1984) p775-778.
- 5) 山根 功, 「加速器」 Vol. 10, No. 1, 2013 (20-31).