

## Laser Stripping 開発の新段階

山根 功\*

### New Phase of Development for Laser Stripping

Isao YAMANE\*

#### Abstract

It was shown in Mini-Workshop on Laser-Assisted  $H^-$  stripping held at SNS on Feb. 18-19, 2009 that the laser stripping development has come into a new phase. The main subject of this phase is how to supply laser pulse with necessary energy density to every  $H^0$  micro-bunch which comes at a repetition rate of hundreds MHz. An exposition is also given on the reason why the laser stripping development has been undertaken, the Doppler broadening of the laser frequency as the most serious problem, two methods proposed to overcome this problem, and development of Proof-Of-Principle experiments of these methods.

### 1. 新しい段階に入った Laser Stripping 開発

今年2月18, 19日の両日, 米国オークリッジ国立研究所 SNS (Spallation Neutron Source) において, 第一回 Mini-Workshop on Laser-Assisted  $H^-$  Stripping が開催された<sup>1)</sup>. 大強度陽子リング荷電変換入射のための  $H^-$  ビームの Laser Stripping については, この数年来, 原理実証実験 (POP 実験) として Frequency Sweeping 法と Level Broadening 法との二つの方法が試みられてきた (これらの方法については第3節以降に詳しく説明する). このワークショップは, SNS でこれまで推進されてきたレーザーstrippingの Frequency Sweeping 法の POP 実験が成功を収めた<sup>2)</sup> ことを受け, また近い将来 SNS のビーム強度が MW の領域に入っていくことをにらんで, いよいよ SNS リングのビーム入射にレーザーstrippingを適用する課題を検討する最初のワークショップであった. SNS の加速器グループとしては, SNS リングのレーザーstripping入射系の設計に入る前に, レーザービームや入射電磁石系に求められる要請を明確にし, その実現方法を確かめるため, 1 GeV  $H^-$  ビーム輸送ラインの途中に実験領域を設置して実験することを計画しており, このワークショップはここでの実験を組織することを目標としていた. 加速器

の専門家, レーザーの研究者にレーザーメーカーの技術者を含め 30 名ほどの参加者による熱心な討論が展開された. 筆者は, 必要なレーザービームを供給する方法についての提案と, レーザーstrippingの Level Broadening 法の提唱者の立場からこの方法を SNS リングに適用する場合の入射系の提案を行った.

このワークショップに参加して強く感じたことは, レーザーstrippingの開発が, 原理実証実験の段階を終え, いまや実際の加速器の入射系の開発研究の段階に移ったということである. 残念ながら筆者らの推進した Level Broadening 法に関する原理実証実験はデータを得るに至らなかったが, 議論が分かれ実験で確かめたかった Level Broadening 法で必要となるレーザービームのエネルギー密度について, 今では共通の理解が得られている.  $H^0$  の幅の広い励起状態の存在は実験的に確認されており<sup>3)</sup>, Level Broadening 法で必要となるレーザービームのエネルギー密度は Frequency Sweeping 法の場合とほぼ同じであると考えられる<sup>4)</sup>. したがって, Level Broadening 法についても, 実際の加速器の入射系にそれを適用するための開発研究の段階に移っていくことが妥当であろうと考えられる. この段階での主要な開発課題は, どちらの方法をとるにしても次の二つ

課題 1. 数百 MHz で入射される水素のマイクロバン

\* 高エネルギー加速器研究機構 名誉教授  
(E-mail: isao.yamane@kek.jp)

チの全てに必要なエネルギーのレーザーパルスビームを供給する方法の開発

課題2. 入射  $H^0$  ビームを必要な形状に成形し、リング周回ビームへの手当てや残留  $H^-$  および  $H^0$  ビーム処理法からの要請を満たすための電磁石系の設計

## 2. なぜ Laser Stripping が必要なのか？

大強度陽子リングへのビーム入射において、入射用加速器で適当なエネルギーに加速した  $H^-$  ビームをリングの入射点で陽子ビームに変換して入射する荷電変換入射は、陽子ビームのリング内積み上げが Liouville の定理による制限を受けないので、空間電荷効果の制限いっぱいまで入射可能であり、現在では標準的な入射法となっている。荷電変換媒体としては、水銀ジェットやガスが使われたこともあるが、最近では炭素 (C) や酸化アルミニウム ( $Al_2O_3$ ) の薄膜が標準的に使われている。これらの固体薄膜 (以下ストリッピングフォイル) は、入射する  $H^-$  ビームの強度があまり高くない間は大変便利な荷電変換媒体であったが、近年陽子ビーム強度が MW の領域に近づくとともに、以下のような深刻な問題点が指摘されるようになった。このような深刻な問題を回避する方法のひとつとして、レーザーストリッピングの開発が取り組まれるようになったのである<sup>5)</sup>。

ストリッピングフォイルの主な問題点は次のようなものである。

1. 薄膜を通過する陽子のエネルギーロスによって薄膜が加熱され、2,000 度 C を超えるような高温に達するため、薄膜は変形したり、亀裂を生じて荷電変換の性能が著しく低下するとともに、膜の寿命が短縮する。このため、大強度陽子ビームの照射下で寿命の長い Foil の開発が試みられており、Diamond Foil<sup>6)</sup>、HBC (Hybrid Boron-mixed Carbon) Foil<sup>7)</sup>、CNT (Carbon Nano-Tube) Foil<sup>8)</sup>などが報告されている。

2. ストリッピングフォイルの原子により入射ビーム中の陽子が散乱され、周辺の機器を放射化する。リング捕捉ビームの強度を上げるには、空間電荷効果を軽減する必要があり、そのため入射ビームのエネルギーは出来るだけ高く設定される。放射化は、ロスするビームパワーの増加に略比例して高くなり、加速器の維持保守作業に影響を与えるようになる。筆者が以前稼働中の加速器について調査したところ、ひとつのリングでビームロスが 400 W 程度以下に抑えるようにしていることが分かったが、これは加速器の維持保守作業に伴う作業員の放射線被曝を許容値以下に抑え

るためであると考えられる<sup>9)</sup>。入射ビームのストリッピングフォイル通過に伴うビームロスの原因としては次のような過程が考えられる。

- Nuclear Scattering
- Large Angle Coulomb Scattering
- Electron Scattering with Large Momentum Transfer

この内最も深刻なのは Nuclear Scattering であると考えられる。これらを評価してみると、 $300 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  の炭素薄膜の場合、1 GeV 陽子の平均 Foil Hit Number が 20 回として、ビームロスの割合は  $\sim 1.5 \times 10^{-4}$  程度になる。したがって、1 MW の陽子ビームではビームロスは  $\sim 150$  W 程度、4 MW では  $\sim 600$  W 程度となって許容できる限界に達すると考えられる。ここで、Foil Hit Number と言うのは、リングへのビーム入射の間にひとつの陽子が Foil を Hit する回数である<sup>10)</sup>。  $H^-$  ビームとして入射される際フォイルを通過した後、リング軌道に捕捉された陽子はベータatron振動をしながらリングを周回し、入射点に戻る度にある割合でフォイルをヒットする。したがって、入射時間の始めに入った陽子と終わりにに入った陽子では、フォイルをヒットする回数が大幅に異なる。このため、ビームロスの評価するためには平均 Foil Hit Number を考慮する必要がある。ストリッピングフォイルはビーム照射によって変形するので Foil Hit Number も変化し、入射効率を維持しようとする平均 Foil Hit Number は増大する傾向がある。このように、ストリッピングフォイルによるビームロスは MW の陽子ビームを入射する場合、許容限界を超える恐れが大いにあると考えられるのである。

## 3. Laser Stripping の可能性と問題点

$H^-$  イオンの二つの電子を剥ぎ取ることは、原子過程であり、光反応によっても可能であろうと思われるが、実際にはどのようなことが考えられるのであろうか？ 二つの電子の内一つは 0.755 eV の結合エネルギーで中性の  $H^0$  に緩く結合しており、 $H^-$  イオンのエネルギーが 800 MeV 程度以上では、1 T 程度の磁場を通過させると Lorentz Stripping により略完全に剥ぎ取れることが分かっている。このことについては、Los Alamos PSR (Proton Storage Ring) でビーム入射に適用されたことがあり、その経験を通じて多くのことが分かっている。

磁場中で一つの電子を剥ぎ取られた後  $H^0$  は基底状態に残される。基底状態の電子の結合エネルギーは 13.6 eV であるが、この電子を直接剥ぎ取るには  $H^0$

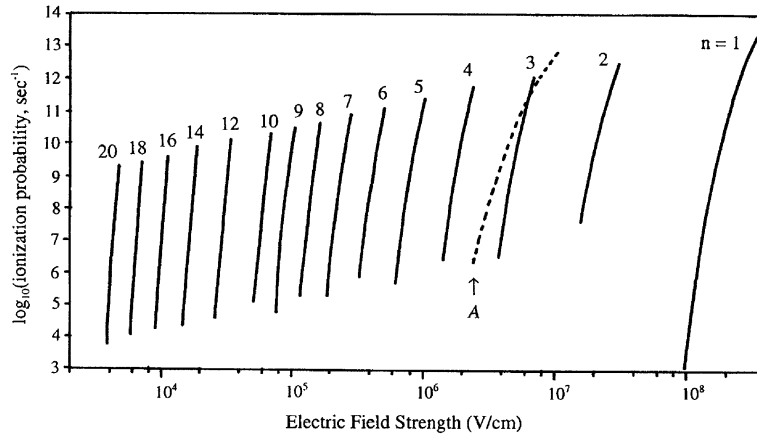


図1  $H^0$  原子のイオン化確率の電場依存性.  $n$  はレベルの主量子数を表し, 実線は同じ主量子数をもついくつかのレベルの内の一つの電場依存性を表す. 矢印 A をつけた点線は  $H^-$  イオンについて中性化確率の電場依存性を表す.

の静止系 (以下 PRF) で 91.1 nm より短波長の photon が必要である. 光脱離反応の断面積は  $\sim 10^{-17} \text{ cm}^2$  であるので,  $H^0$  に  $\sim 200 \text{ mJ/cm}^2$  のエネルギー密度の光を照射する必要がある,  $H^0$  と光との反応時間が 100 psec 程度とすれば光の強さは  $\sim 2 \text{ GW/cm}^2$  となる. これは,  $H^0$  の PRF での値であるが, 実験室系 (以下 LF) では Doppler 効果によって少し現実的な値に近づく. たとえば, 1 GeV の  $H^0$  ビームにレーザービームを 45 度の角度で衝突させる場合には, レーザーの波長は 305 nm より短い必要があり, エネルギー密度は  $\sim 40 \text{ mJ/cm}^2$  である. この波長は紫外線の領域であり, このエネルギー密度のレーザービームを数百 MHz の繰り返し周波数で入射してくるすべてのマイクロバンチに供給することはかなり難しいことは想像に難くない. そこで, もう少し現実的な方法を模索しているうちに次に述べるようなヒントを得た.

図1は, 強い電場中に置かれた時,  $H^0$  原子の各レベルのイオン化確率と  $H^-$  イオンの中性化確率がどのような電場依存性を示すかプロットしたものである<sup>5)</sup>.  $n$  は  $H^0$  原子のレベルの主量子数を表し, 実線は同じ主量子数のいくつかのレベルの内の一つについて電場依存性を示す<sup>11)</sup>. 矢印 A をつけた点線は  $H^-$  イオンについて中性化確率の電場依存性をプロットしたものである<sup>12)</sup>. この図で興味あることは,  $H^-$  イオン中性化の電場依存性を表す曲線が  $H^0$  原子の  $n=3$  の曲線と重なっていることである. このことは  $n=3$  のレベルにある  $H^0$  原子は,  $H^-$  イオンの中性化に必要な電場と同程度の強さの電場で, また  $n$  が 3 以上のレベルではもっと弱い電場でイオン化できることを示して

いる. 高エネルギー  $H^-$  イオンの中性化については, Los Alamos PSR での経験により, 実用的な磁場中で Lorentz Stripping により効果的に行うことが出来ることがわかっている. したがって, Lorentz Stripping により中性化され基底状態 ( $n=1$ ) にある  $H^0$  原子をレーザーにより  $n=3$  以上のレベルに光励起できれば, 再度適当な磁場を通過させることによって電子を剥ぎ取り, proton に変換できるはずである. 例えば, 1 GeV の  $H^0$  ビームにレーザービームを 40 度の角度で衝突させる場合,  $H^0$  原子を基底状態から  $n=3$  のレベルに励起するのに必要なレーザーの波長は 355 nm となる. この波長のレーザーとしては Nd:YAG レーザーの 3 倍高調波が使用できる. このようなことから次のような 3-step Stripping が提案された.

- 1st step:  $H^- \rightarrow H^0$  (Magnetic Stripping)
- 2nd step:  $H^0 + \gamma \rightarrow H^{0*}$  ( $n \geq 3$ ) (Photo-Excitation)
- 3rd step:  $H^0 \rightarrow p + e$  (Magnetic Stripping)

この 3-step Stripping で一つの  $H^-$  イオンの二つの電子を剥ぎ取ることは可能であるが,  $H^-$  ビームを proton ビームに変換するとなるとそう簡単ではない. それは,  $H^-$  ビームが運動量の広がり (momentum spread) を持つため, 2nd step において励起の遷移周波数が Doppler 効果による広がり (Doppler Broadening) を持つからである. 遷移周波数を  $\nu_0$ ,  $H^0$  ビームの速度の中心値と光速の比を  $\beta$ , 運動量の広がり  $\Delta p/p$  とすると, Doppler Broadening  $\Delta \nu$  は次のように表される.

$$\Delta \nu = \nu_0 \beta (\Delta p/p) \quad (1)$$

$\Delta p/p$  を  $\sim 10^{-3}$  とすると,  $n=3$  のレベルでは  $\nu_0 = 2.9$



$\times 10^{15}$  Hz, また  $1 \text{ GeV } H^0$  では  $\beta = 0.875$  だから  $\Delta\nu$  は  $2.5 \times 10^{12}$  Hz となる. この広がり, レーザービームの通常のバンド幅でカバーするには大きすぎるため, 何らかの工夫が必要である.

大強度陽子加速器の荷電変換入射のためのレーザーstrippingについては, ICFA-HB2002 の H-Stripping セッションではじめて取り上げられたが, その時点で次の 3 つの方法が Doppler Broadening をカバーするため提案されていた<sup>13)</sup>.

- i) 磁場勾配によりその中で高エネルギー  $H^0$  が受ける Lorentz 電場の勾配をつくり, Stark 効果によって  $H^0$  のレベルを変化させ, Doppler Broadening をカバーする<sup>14)</sup>.
- ii) 適当な角度の広がりを持たせたレーザービームと  $H^0$  ビームとを衝突させ, 角度とともに変化する光の周波数をスイープする内に, すべての  $H^0$  が遷移周波数を通過するようにし, 電子や陽子のスピン反転を効率よく行うため工夫された Froissard-Stra の方法<sup>2)</sup>を応用して, 効率よく励起する.
- iii) 強い Lorentz 電場により,  $H^0$  の励起状態のレベル幅を Doppler Broadening 程度に広げ Doppler Broadening をカバーする<sup>15)</sup>.

これらの内 i) と ii) は, 励起状態のエネルギーレベルか入射レーザーの周波数のどちらか一方を変化させて Doppler Broadening をカバーするので, Frequency Sweeping 法と呼ばれる. 一方, iii) の方法は励起状態のレベル幅を広げるので Level Broadening 法と呼ばれる.

ICFA-HB2002 の後, これらの方法の有効性を確かめる実験が計画実行された. Frequency Sweeping 法については ii) の方法について SNS で実験が行われ, Level Broadening 法については, KEK と BNL のグループによって BNL 200 MeV  $H^-$  を使う実験が行われた.

#### 4. Level Broadening 法の POP 実験

速度  $\beta c$  ( $c$  は光速) の高エネルギー  $H^0$  は磁場  $B$  の中では,  $H^0$  の PRF で

$$E = \beta\gamma c B \quad (2)$$

の電場を受ける. ここで,  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$  である. この電場による Stark 効果で,  $H^0$  の励起状態のエネルギーレベルはスプリットし, 磁場を変化させると等価な電場の変化に伴ってそれらのレベルはシフトする.

図 2 は  $H^0$  の幾つかの励起状態についてスプリットと

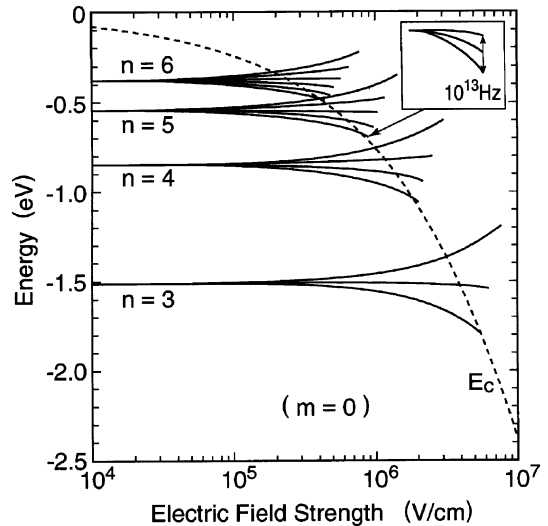


図 2 Stark 効果による  $H^0$  のレベルシフトの電場依存性. 磁気量子数 ( $m$ ) が 0 のレベルのみ記載してある.

シフトの電場依存性を示している. この図に示すように, 電場が強くなるとレベルシフトは大きくなり, 電場の関数であるクリティカルヴァリュー ( $E_c$ ; Lorentz 電場と陽子の Coulomb 電場が形成する Potential Barrier のトップのエネルギー) がレベルに近づくるとレベルの幅が急速に広がる. この幅は  $10^{13}$  Hz 程度以上に広がりその後レベルはレベルとして確認できなくなる. このように幅の広がったレベルは, 実験的にも確認されている<sup>3)</sup>. Level Broadening 法は励起状態のレベルをこのように広げて, Doppler Broadening をカバーしようとする方法である. この方法で, Doppler Broadening をカバーすることが出来るかどうか, 実際の加速  $H^-$  ビームを使って確かめてみようと言う計画が, ICFA-HB2002 の後提案された. 当時, 実験を遂行する上で最も条件が良いと思われたのは, BNL 200 MeV Linac であったので, 200 MeV  $H^-$  ビームを使う実験が計画された.

図 2 からわかるように,  $n=3$  の最もエネルギーの低くなるレベルでは, そのレベル幅を Doppler Broadening 程度に広げるには  $5.6 \text{ MV/cm}$  の電場が必要である.  $200 \text{ MeV } H^-$  の  $\beta, \gamma$  はそれぞれ  $0.556, 1.213$  であるので, その電場を得るには  $2.7 \text{ T}$  の磁場が必要であり, この磁場を発生させるには超伝導電磁石が必要となる. しかし,  $n=4$  の最も低いレベルであれば, 同程度レベル幅を広げるのに  $1.9 \text{ MV/cm}$  の電場でよく, これなら  $0.9 \text{ T}$  の磁場で可能である. レベルエネルギーが少し高くなり, 遷移エネルギーが  $12.6 \text{ eV}$  となるが, このエネルギーは  $157 \text{ nm}$  の  $F_2$

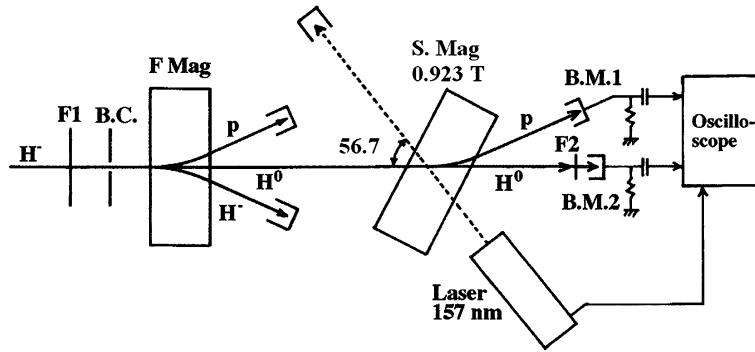


図3 200 MeV  $H^-$  ビームを用いる Level Broadening 法の POP 実験セットアップの概念図 ( $n=4$  の最も低い状態を使う場合)。

レーザービームを 200 MeV  $H^-$  ビームに対し 56.7 度で衝突させれば得られる。この方法で、Doppler Broadening をカバーすることが出来るかどうかを確かめるだけなら、200 MeV  $H^0$  ビームのマイクロバンチ 1 個を proton ビームに変換できたことを確かめれば十分である。これなら、 $F_2$  エキシマレーザーで可能である。市販のエキシマレーザーで、パルス長 20 nsec, パルスエネルギー 50 mJ のものが入手できるので、これを使えば、POP 実験は可能であることが分かった。

実際の実験のセットアップは図3のように設計された。 $H^-$  ビームを  $H^0$  ビームに変換するためには、200 MeV では、磁場による Lorentz Stripping であまりにも強い磁場が必要となるので、 $20 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  の炭素薄膜を用いた。これにより約 50% の  $H^-$  ビームが  $H^0$  ビームに変換される<sup>16)</sup>。残留の  $H^-$  ビームと proton ビームを Filter Magnet で取り除き、 $H^0$  ビームを Stark Magnet に導入する。Stark Magnet の磁場を 0.92 T として  $H^0$  の  $n=4$  の励起状態の幅を  $2 \times 10^{13}$  Hz 程度に広げ、レーザービームと衝突させる。レーザーとしては波長 157 nm の  $F_2$  Laser を使い、Doppler 効果により遷移周波数にあわせるため衝突角を 56.7 度とする。レーザーにより励起され、ストリッピングが起これば proton ビームが発生する。proton ビームは磁場により曲げられて、検出器に導かれる。 $H^0$  ビームは 200 MHz のマイクロバンチトレインとして来るが、想定したように Laser Stripping が起これば、レーザービームパルスと同期して proton ビームマイクロバンチが検出されると考えられる。既に記したように、強い磁場中で広がったレベルと光励起により励起されたそのようなレベルが崩壊して発生した proton は観測されている<sup>3)</sup>。今回の実験ではそのような Laser Stripping の効率を調べるのが主目標であ

るので、それにあった検出器を用いることとなる。必要なレーザービームの強度は次のように評価される。 $H^0$  の基底状態から励起状態 ( $n$ ) への遷移波長を  $\lambda_{1n}$  とし、励起状態のレベル幅を  $\Delta\omega_a$ 、励起状態から基底状態への遷移確率を  $A_{n1}$  とすると、基底状態から励起状態 ( $n$ ) への光励起断面積  $\sigma_{1n}$  は次の式で表される<sup>17)</sup>。

$$\sigma_{1n} = \frac{\lambda_{1n}^2 A_{n1}}{2\pi \Delta\omega_a} \quad (3)$$

ここで、簡単のために二つの状態の縮退数はともに 1 とした。また、 $A_{n1}$  は電場の中での遷移確率であるが、参考文献 18 に Table がある。この式より、必要なレーザーのエネルギー密度  $\Phi_{1n}$  は、

$$\Phi_{1n} = a \times (\hbar\omega_{1n}/\sigma_{1n}) \quad (4)$$

である。 $\omega_{1n}$  は遷移周波数である。式(3)、(4)で与えられる値は、PRF の値であり、実際のレーザーの周波数およびエネルギー密度は、LF に換算したものを使わなければならない。 $a$  は励起の効率の目標をどの程度にとるかによる。95% では  $a=3$ 、99% では  $a=5$  をとる必要がある<sup>19)</sup>。

実験に用いる  $F_2$  エキシマレーザーは 2002 年度に購入され、国内で調整運転が行われた後 BNL に移設された。実験計画は、日米協力事業のサポートを得て、2003 年度より 3 年計画としてスタートした<sup>20)</sup>。図4に示すように、実験用ビームラインは BNL 200 MeV Linac REF (Radiation Effect Facility) トンネル内に設置された。BNL 側は、 $H^-$  ビームの輸送系、衝突点での  $H^0$  ビーム形成を分担し、日本側はレーザー装置、Stark Magnet、分析装置を分担した。日本側は限られた予算で必要な機器を日本で製作し、米国へ輸送することはかなり時間を要することであった。また、

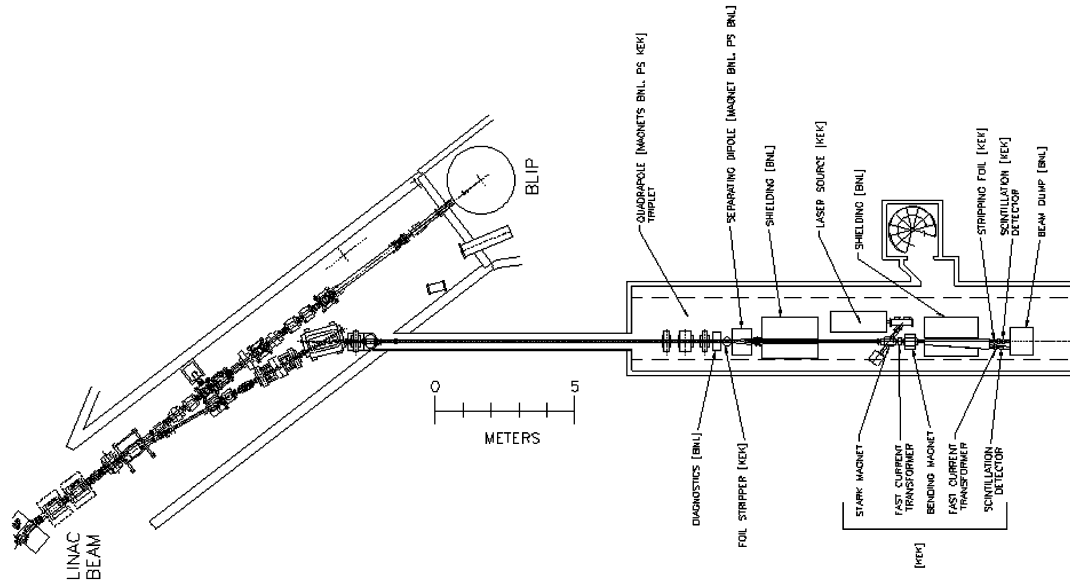


図4 BNL 200 MeV Linac REF トンネルに設置された POP 実験用ビームライン

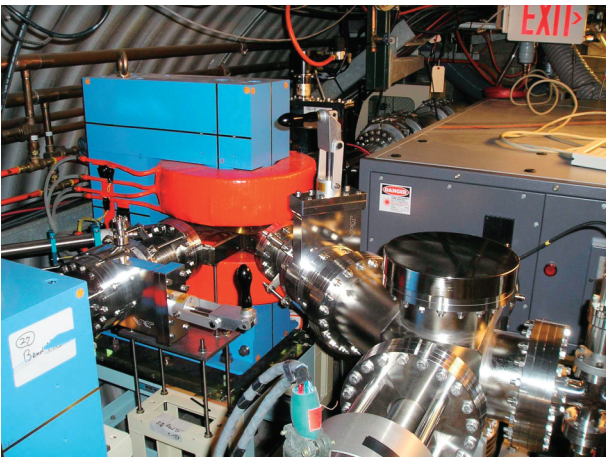


図5  $F_2$  エキシマレーザーと Stark Magnet.  $H^0$  ビームとレーザービームの衝突点は Stark Magnet の磁場中心。

BNL での機器設置に当っては、BNL の作業部門のスケジュールに合わせて日本側メンバーの滞在中に進める必要もあり、BNL 側の多大の協力があったがやはり時間がかかった。

それでも、2005 年 2 月頃にはビームラインはほぼ完成し、少し遅れたが 2005 年 6 月に最初のビームタイムをもらった。ほとんど手探り同様であったが、200 MeV  $H^-$  ビームを新しいビームラインに通し、炭素薄膜により  $H^0$  ビームに変換することはできた。しかし、衝突点で期待したビームスポットを確認することは出来なかった。それでも、形状の分からない  $H^0$  ビームとレーザービームを衝突させ、変換した

proton の検出を試みた。この試みは成功しなかったが、その後何度かのビームタイムを得て、 $H^0$  ビーム形成の改善、ビームモニタリング、proton 検出器等の改善を行えば、実験を遂行できると言う確信を持たせるものであった。

しかし、その後 2005 年には BNL の予算事情の悪化により、加速器運転のスケジュールが立たない状況が続いた。民間資金の協力を得て運転されることもあったが、急にビームタイム提供を提案されても、日本から複数のメンバーが実験準備を整えて BNL に出向くことは困難であった。また、2006 年には遅れて加速器運転が決まったが、RH IC の運転が優先されるため、200 MeV Linac の運転は翌年の 4 月以降となり、その時には日米協力事業の旅費が使えず BNL へ行くことが出来ないということもあった。このようなことが重なり、BNL での実験継続が困難となったが、その頃、J-PARC の 200 MeV Linac がビーム加速に成功し、BNL での Laser Stripping POP 実験は J-PARC に移して継続したらという提案が出された。日米協力事業の研究費サポートも 2006 年度で終了されることが決定されていたこともあり、その後は J-PARC での継続の可能性を模索することとして、一旦 BNL REF トンネルの実験装置は解体され、KEK の資産は KEK に送り返された。J-PARC での実験再開は、研究体制の再編が困難なこともあり、まだ実現していない。



### 5. Frequency Sweeping 法の POP 実験

Frequency Sweeping 法の POP 実験については、素過程の物理、実験のセットアップ、実験の結果等の詳しい記述が参考文献 2 にあるので、そちらを参照して頂くこととし、ここでは、概要を説明するにとどめる。

H<sup>0</sup> 励起状態のレベル幅を広げないで、自然の幅のままに光励起する場合、励起状態の寿命が長いので、励起が進むにつれて励起状態にある H<sup>0</sup> 原子の割合が増える。光の吸収と誘導放射は同じ確率で起こるため、励起状態の原子の割合が増加すると誘導放射で励起状態から基底状態へ戻る割合も増加し、光の周波数分布が励起状態の幅程度であれば Rabi Oscillation を起こす。したがって、その振動の半周期を使えば効率よく水素原子を励起できる。しかし、H<sup>0</sup> ビームの H<sup>0</sup> をレーザーにより励起する場合、H<sup>0</sup> ビームの運動量分布に基づく Doppler Broadening により、個々の H<sup>0</sup> 原子の見えるレーザーの周波数の広がり励起状態のレベル幅よりはるかに広いため、Rabi Oscillation を有効に使うことは不可能である。

しかし、このような場合、電子のスピン反転等に用いられる Froissart-Stora 効果<sup>21)</sup>を応用することが出来る。この方法では、図 6 に示すように、レーザービームに角度 (α) の広がりを持たせ H<sup>0</sup> ビームと衝突させる。Doppler 効果のため、H<sup>0</sup> に対しレーザービームは角度により異なった周波数をもち、H<sup>0</sup> に対してレーザービームの周波数がスweepされる。各々の H<sup>0</sup> はレーザービームの中でその遷移周波数を通過するが、その前後で励起状態の割合は変化し、レーザービームの周波数スweepの速さとビーム強度が適当であれば、図 7 のように効率よく励起することが出来る<sup>2)</sup>。

このとき、H<sup>0</sup> ビームがレーザーを通過した後、励起状態に残る確率は

$$C_n^2 = 1 - \exp\left(-\frac{\pi\Omega^2}{2\Gamma}\right) \quad (5)$$

と表される。ここで、 $\Omega = \mu_{1n} \sqrt{2Q_0/c\epsilon_0} / \hbar$  は Rabi 周波数、 $Q_0$  はレーザーパワー密度 (W/m<sup>2</sup>)、 $\mu_{1n} = \int dr^3 u_1^*(\vec{r}) ezu_n(\vec{r})$  は遷移双極子モーメント、 $\Gamma = d\omega/dt$  は光の周波数のスweep速度である。水素原子がレーザーの中を通過する時間 (T) にレーザーの周波数は  $\Delta\omega_D$  変化するので、 $\Gamma = \Delta\omega_D/T$  である。

(5)式の exp の肩を -a と置くと、

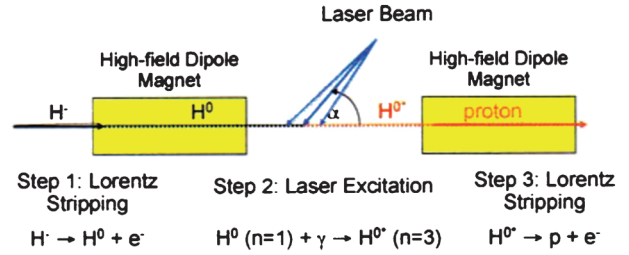


図 6 Frequency Sweeping 法のセットアップ概念図。

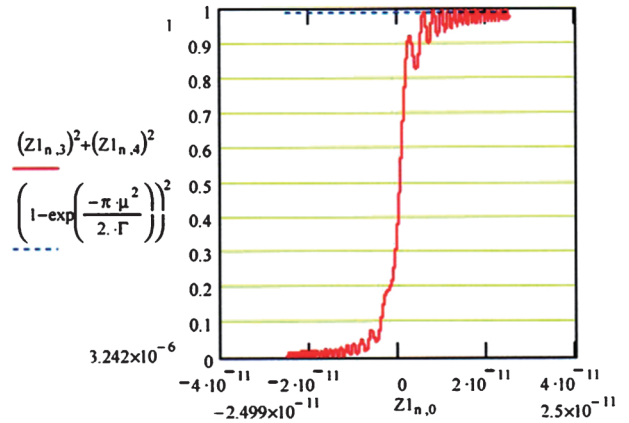


図 7 Froissart-Stora 効果を利用した励起。

$$a = \frac{\pi\Omega^2}{2\Gamma} = \frac{\pi\Omega^2 T}{2\Delta\omega_D} = \frac{\pi\mu_{1n}^2 Q_0 T}{c\epsilon_0 \hbar^2 \Delta\omega_D} = \frac{\pi^2 c^2 A_{n1} Q_0 T}{\hbar\omega_{1n}^3 \Delta\omega_D} = \frac{\lambda_{1n}^2 A_{n1} Q_0 T}{4\hbar\omega_{1n} \Delta\omega_D} \quad (6)$$

と書き換えることが出来る。ここで、 $\lambda_{1n}$  は光の波長、 $A_{n1}$  は励起状態から基底状態への遷移確率である。 $Q_0 T$  はレーザーエネルギー密度  $\Phi$  であるから、

$$\Phi = a \times \frac{\hbar\omega_{1n} \cdot 4\Delta\omega_D}{\lambda_{1n}^2 A_{n1}} \quad (7)$$

である。この場合も、a は励起の効率の目標をどの程度にとるかにによる。95% では a = 3, 99% では a = 5 をとる必要がある。

### 6. 必要なレーザーのエネルギーデンシティーはほぼ同じ！

式(4)と(7)とを比較すると、二つの方法で必要なレーザーのエネルギーデンシティーがほぼ等しいことが分かる。二つの式で、係数がわずかに異なるが、これは必要なレーザーのエネルギーデンシティーを求めるとき、Level Broadening 法ではレベルの広がりを Lorentzian 分布で記述してその積分を採るのに対し

Frequency Sweeping 法ではレーザービームの分布を Gaussian 分布で記述してその積分を採ることによると考えられる。同じ  $n$  の励起状態に励起する場合でも、Frequency Sweeping 法では、自由空間で縮退の解けていない状態に励起するのに対し、Level Broadening 法では、強い電場の中で Stark 効果によりスプリットし、エネルギーレベルのシフトした状態に励起する。このため、遷移周波数が異なり、必要なレーザーの波長は異なる。また、Level Broadening 法では、 $A_{n1}$  は電場の中で Stark 効果の影響を受けた値を採る必要がある。しかし、これらの違いは大きなものではない。したがって、二つの方法ではほぼ同じ程度のレーザーのエネルギー密度が必要となると言える<sup>4)</sup>。

例えば、ビームエネルギーが 1 GeV の場合、Nd:YAG レーザーの 3 倍高調波 (355 nm) を使って、 $H^0$  を  $n=3$  のレベルに励起するために LF で必要となるレーザーエネルギー密度として、Level Broadening 法では  $3.6 \times a$  ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )、Frequency Sweeping 法では  $1.2 \times a$  ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ) という値が得られる。 $a$  は前述のように、励起効率をどの程度にするかによって決まるパラメータである。このエネルギー密度は個々の  $H^0$  が通過すべきレーザービームの厚さであるが、 $H^0$  がレーザービームを通過する時間は 50 psec 程度であるので、パワー密度は  $100 \text{ MW}/\text{cm}^2$  程度となる。一つの  $H^0$  マイクロバンチの長さが 30 psec 程度とすると、一つの  $H^0$  マイクロバンチを効率よく励起するためには、レーザーパルスの長さは 80 psec 程度必要である。一方、 $H^0$  ビームのスポットを小さくすれば、レーザービームの断面積を小さくすることが出来る。レーザービームの断面積を  $0.2 \text{ cm}^2$  程度にすれば、レーザーパルスのエネルギーは 1.6 mJ 程度となる。多分、これは少な目の見積もりで、POP 実験はこれでやれるとしても、実際の加速器に適用する場合にはもう少し余裕のある見積もりが必要であろう。

## 7. 第一回 Mini-Workshop on Laser-Assisted $H^-$ Stripping での議論

Frequency Sweeping 法の POP 実験の成功を受けて開催されたワークショップであったが、今回は実際の SNS リング入射部にレーザーstripping用入射装置を導入する具体案の検討会というより、むしろその具体案を設計する前の Intermediate Step の実験を組織するための検討会という印象であった。具体案を設計する前に、前述の二つの課題を解決する必要が

あるからである。

POP 実験では一つのマイクロバンチを励起できればよかったが、実際の SNS リング入射に適用する場合には、400 MHz でやって来るすべてのマイクロバンチに必要なレーザーパルスエネルギーを供給しなくてはならない。これが第一の課題である。前節にも記したように、一つのレーザーパルスのエネルギーを 1.6 mJ とし、ビーム入射の繰り返し周波数を 60 Hz、一回の入射時間を 1 msec とすると、平均のレーザーパワーは 38 kW になる。このレーザーの 1 パルスを  $H^0$  ビームの 1 マイクロバンチのstrippingに使うだけで垂れ流すのはあまりにももったいない。レーザーの 1 パルスには  $5 \times 10^{14}$  個の photon が含まれるが、4 MW  $H^0$  ビームの 1 マイクロバンチ内のすべての  $H^0$  を励起したとしても、消費される photon は  $10^9$  個である。したがって、レーザーパルスはほとんど影響を受けない。このことは、出来るだけレーザーパルスは、繰り返し利用すべきことを意味している。レーザーパルスを繰り返し利用できれば、その分レーザーソースに求められるレーザーパワーも軽減される。このワークショップでも、専門のレーザー研究者により Fabry Perot Resonator や Ring Resonator を適用するいくつかの Laser Recycler System 案が報告された。

筆者もこのような Laser Recycler System が必要であると考え、もうひとつ別の心配がある。前節で記したように、レーザーパルスのパワー密度は  $100 \text{ MW}/\text{cm}^2$  になるが、その場合レーザービーム内の電場は  $300 \text{ kV}/\text{cm}$  程度になる。Laser Recycler System をミラーにより構成する場合、ミラーには 400 MHz の繰り返しでこの電場が印加される。ミラーは反射に伴う損失を少なく抑えるため高反射率のミラーになると思われるが、このような電場に耐えられるのであろうか。このような心配から、今後の検討課題として、出来るだけミラーを用いない Laser Circulator の提案を行った。

いずれにしても、数百 MHz で数 mJ、数十 psec のレーザーパルスをリサイクルする Laser Recycler System を開発することが今後の主要な課題である。そして、この Laser Recycler System がどのようなものになるかを見極め、入射  $H^-$  ビーム、 $H^0$  ビーム、リング周回陽子ビームへの配慮を盛り込んで、上記の第二の課題である入射用電磁石系を設計することになると考えられる。今回のワークショップでは Frequency Sweeping 法に用いる入射用電磁石系の案は提示されなかった。レーザービームや  $H^0$  ビームの形



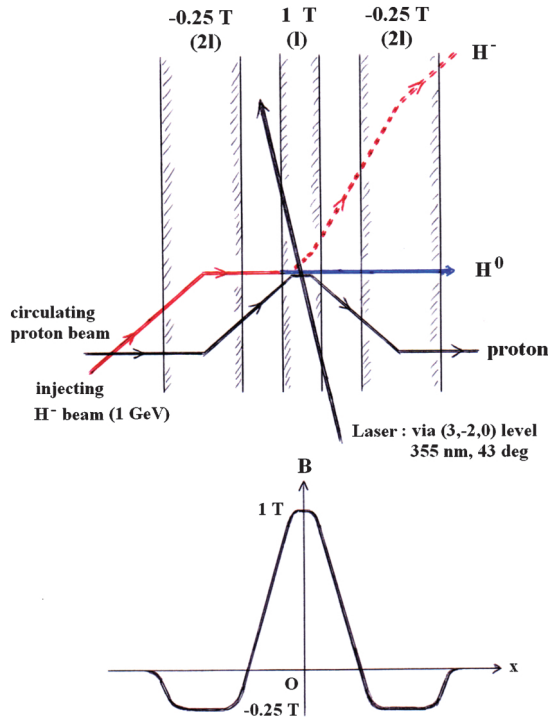


図 8 Level Broadening 法のための 3-magnet Wiggler を用いる Laser Stripping System.

状に対する要請が比較的簡単な Level Broadening 法については、筆者より図 8 に示すような 3-magnet Wiggler を用いる入射電磁石系の案を提案した。真中の磁場が 1 T であるのは、1 GeV  $H^0$  の  $n=3$  励起状態のレベル幅を Doppler Broadening 程度に広げるためである。また、両側の磁場が、0.25 T であるのは、1 GeV  $H^-$  がストリップされないように低い磁場を使う必要があるからである。また、リング周回 proton ビームに影響を与えないように、磁場全体として Wiggler を構成する。入射  $H^-$  ビームは、中央の電磁石の入り口エッジで磁場が 1 T 近くに立ち上がったところで電子を剥ぎ取られ、良い効率で  $H^0$  に変換される。生じた  $H^0$  は、1 T の磁場により、 $n=3$  励起状態のレベル幅を Doppler Broadening 程度に広げられる。その後  $H^0$  は 355 nm のレーザービームと相互作用し、幅の広い  $n=3$  のレベルに励起されるが、そのレベルの寿命は非常に短い ( $\sim 10^{-13}$  sec) のですぐ proton と electron に崩壊する。生じた proton はリングのビームの軌道に乗るというシナリオである。もちろん、これだけでは入射装置にはならないので、幾つかのモニターや剥離された電子のコレクターなどを含め詳細な設計が必要である。

## 8. まとめ

今年 2 月 SNS で、第一回 Mini-Workshop on Laser-Assisted  $H^-$  Stripping が開催された。今回のワークショップは、SNS リングの Laser Stripping 入射装置の具体的検討に入る前に、Laser ビームや入射電磁石系の備えるべき必要条件を明らかにする実験を組織することが目的であったと思われる。Laser Stripping 開発は、POP 実験の段階を終え、実際のリングの Laser Stripping 入射装置を開発する段階へ入ったと言える。この段階の第一の課題は、必要なエネルギーのレーザーパルスで 400 MHz の繰り返しでやってくる全ての  $H^0$  マイクロバンチに供給する方法を開発することであろう。しかし、今日のレーザーの発達が目覚ましいものがあり、この課題も近い将来に解決されるものと期待される。

## 謝辞

筆者の今ワークショップ参加に当って、加速器奨励会より旅費の補助を頂きました。また、高エネルギー加速器研究機構神谷幸秀理事には、筆者等が Laser Stripping 開発研究を推進する上で、特段のご支援を頂きました。ここに、記して深甚の謝意を表します。

## 参考文献

- 1) <https://wiki.ornl.gov/events/lahbsa/default.aspx>
- 2) V. Danilov et al., SNS-Tech Note, **48**, 2002.  
V. Danilov et al., “Three-step  $H^-$  charge exchange injection with a narrow-band laser”, PRST-AB, **6**, 053501 (2003).  
V. Danilov et al., “Proof-of-principle demonstration of high efficiency laser-assisted  $H^-$  beam conversion to protons”, PRST-AB, **10**, 053501 (2007).
- 3) T. Bergeman et al., “Shape Resonances in the Hydrogen Stark Effect in Fields up to 3 MV/cm”, *Phys. Rev. Lett.*, **53**, p775 (1984).
- 4) I. Yamane, “Comparison of the necessary laser energy density to cover the Doppler broadening for the two laser-stripping methods”, KEK Report 2008-5, July, 2008, A.
- 5) I. Yamane, “ $H^-$  charge-exchange injection without hazardous stripping foils”, PRST-AB, **1**, 053501 (1998).
- 6) R. W. Shaw, A. D. Herr, C. S. Feigerle, R. I. Cutler and C. J. Liaw, Proc. PAC 2003, Portland, USA, p. 617.
- 7) I. Sugai et al., “Fabrication of Boron-Mixed Carbon Stripper and Target Backing Foils for High-Power Accelerators”, *JJAP*, **45**(11), 2006, pp. 8848-8852.
- 8) I. Yamane, M. Hagiwara and T. Saito, “Effective thickness distribution of carbon nanotube foils”, KEK

- Report 2007-5, Jan. 2008, A.
- 9) I. Yamane, "On the Limit of Acceptable Beam Loss for a High Intensity Proton Ring", KEK Report 2001-21, Feb. 2002, A/R.
  - 10) Isao Yamane, "A Comment on the Average Foil-hit Number for a High-intensity Proton Ring", KEK Report 2002-2, June. 2002, A.
  - 11) A. C. Riviere, Atomic and Electron Physics-Atomic Interactions, Part A, Method of Experimental Physics Vol. 7, p. 208, Academic Press, New York, 1968. D. S. Bailey, J. R. Hiskes and A. C. Riviere, *Nucl. Fusion* **5**, 41 (1965).
  - 12) H<sup>-</sup> イオンの電子脱離確率の電場依存性の計算には次の論文を参照した。  
L. R. Scherk, "An improved value for the electron affinity of the negative hydrogen ion", *Can. J. Phys.*, **57**, 558 (1979).  
A. J. Jason, D. W. Hudgings and O. B. van Dyck, NEUTRALIZATION OF H<sup>-</sup> BEAMS BY MAGNETIC STRIPPING", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **28**, 2704 (1981).
  - 13) I. Yamane, "Summary Report-SESSION K: H<sup>-</sup> STRIPPING", Proc. of 20th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity and High Brightness Hadron Beams, Batavia, 2002.
  - 14) Y. Suzuki, 12th Symp. Accel. Sci. and Tech., Oct 27-29, 1999, RIKEN, Japan.  
U. Gastaldi and M. Placentino, *Nucl. Instr. Methods*, **A451**, 2709 (2003).
  - 15) I. Yamane, "Feasibility of Laser Stripping via a Broad Stark State for Charge-Exchange Injection into a High-Intensity Proton Ring", KEK Report 2001-20, Feb. 2002, A.
  - 16) R. C. Webber and C. Hojvat, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-26**, 4012 (1979).
  - 17) V. S. Letokhov, "Laser Photoionization Spectroscopy" p. 78, Academic Press, INC. (1987).
  - 18) K. Omidvar, "TRANSITION PROBABILITIES, LIFETIMES, AND BRANCHING RATIO IN HYDROGEN-LIKE ATOMS IN THE LINEAR STARK EFFECT", *ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES*, **28**, 215-238 (1983).
  - 19) 当初、筆者の Laser Beam の Coherence に関する理解不足により、必要なレーザーのエネルギー密度を小さく見積もる誤りがありましたが、現在では、本文に記したように理解しており、このことについて多くの関係者と認識を共有していると考えています。
  - 20) 実験グループの参加者は次の通りである。  
KEK ; 山根 功, 三増俊広, 中山久義, 鈴木敏一, 高山 健, 多和田正文, 佐藤康太郎.  
BNL; D. Raparia, J. Alessi, M. Blaskiewicz, P. Cameron, R. Connolly, A. Hershcovitch, Y. Y. Lee, J. Ritter, V. LoDestro, J. Wei.
  - 21) M. Froissart and R. Stora, *Nucl. Instrum. Meth*, **7**, 297-305 (1960).