

Research of the Polarized Beam Acceleration at the J-PARC 50GeV-PS

Hikaru Sato^{1A)}, Chihiro Omori^{A)}, Naohito Saito^{B)}, Kichiji Hatanaka^{C)},

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization Accelerator Laboratory
1-1 Oho Tsukuba-shi Ibaraki-ken, 305-0045, Japan

^{B)}Kyoto University, Kitashirakawa Oiwakekyo, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8224 Japan

^{C)}RCNP, Osaka University, 10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047 Japan

Abstract

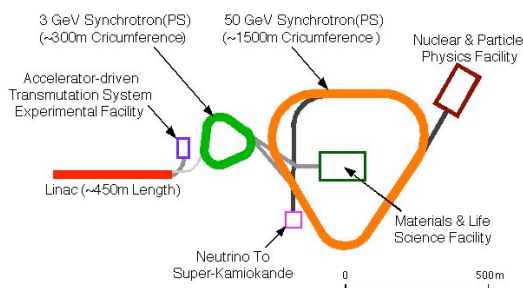
Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), which is JAERI and KEK Joint Project, is now under construction at the Tokai campus of JAERI. Project purpose is providing the high intensity proton beam for nuclear/particle physics, material sciences so far. However, several experiments require the polarized proton beam is also proposed for spin physics. In this report, the scheme of the polarized proton beam acceleration at the J-PARC accelerator complex will be discussed.

J-PARC 50GeV-PSにおける偏極ビーム加速の検討

1. はじめに

現在、原子力研究所東海研に建設中のJ-PARC 50GeV加速器は2007年度完成予定でビーム調整が行われることになっている。すでに、実験課題の受付・審査が始まっている段階であり、ニュートリノ振動実験や稀崩壊実験等だけでなく偏極現象を課題としたLetter of Intent^[1]も申請されてきている。この加速器の将来を展望した時、偏極現象の実験は重要な位置づけを持った課題と思われる。

このために50GeV加速器における偏極ビーム加速の可能性を今から真に検討しておくことは実験課題の審査における判断材料としても重要な加速器技術要素と認識し、具体的な詳細検討に先立ち、まずは考えられる方式について述べておくこととする。加速器群の概要を図1に示す。



High Intensity Proton Accelerator Project

図1：J-PARC加速器群の概要

2. 偏極ハドロンビームの世界的状況

1970年代に弱収束加速器ではあったがアルゴンヌのZGSにおいて偏極ビームを用いた実験が行われ、ZGSのシャットダウン後、SaclayのSATUNE-II、やBNLのAGSにおいて相次いで偏極ビームの加速が実現し実験が行われた^[2]。

12GeV-PSに於いては80年代後半に数GeVにおける偏極陽子ビームを用いて実験が行われた^[3]。しかし、偏極ビーム加速プロジェクトは12GeV-PSにおけるニュートリノ振動実験準備のためのビーム増強プロジェクトとは共存が難しく96年3月に行われた偏極重陽子加速実験^[4]を最後に他の α ビーム加速等のいわゆる多機能化の課題^[5]と共に終演した。減偏極克服用としてリング内に設置されていた装置もビーム増強のために設置を必要とした機器の設置場所確保のために撤去された。その後SATUNE-IIもシャットダウンされた^[6]。

あいついで偏極ビーム加速の施設が閉鎖される理由の1つに加速の煩雑さにもなう困難がある。これを克服する手段としてSiberian Snakeがクローズアップされ、インディアナ大学のクーラーシンクロトロン (IUCF) においてSiberian Snakeの実証実験が長らく行われてきたが、そのIUCFもシャットダウンされた。しかし、IUCFでの実証実験の成果はブルックヘブンのRHICにおいて生き、AGSではRHICへの偏極陽子ビームの入射器として、RFジャンプ、Partial Snakeを用いた偏極ビームの加速を行っている。RHICにおいては偏極ビームコライダーとして超電導ヘリカルコイルによるSiberian Snakeが実用化されている^[7]。

ユーリッヒのCOSYではIUCFにおいてSiberian

¹ Hikaru.sato@kek.jp

Snakeの実証実験をリードしてきたミシガン大学のグループを中心とするチームにより偏極重陽子加速実験が行われている^[8]。DESYにおいてもHERAにおいて偏極陽子ビームを加速し、偏極電子と衝突させるという計画があった^[9]。

これらの計画あるいは実際の状況を概観すると、偏極ビーム加速に於ける減偏極克服法としては以下のような技術的要素がある。

ベータトロンチューンジャンプ

R F ソレノイドによる横方向回転磁場の印加

R F ダイポール垂直方向ベータトロン振動のコヒーレントな励起

CODのハーモニック補正、励起

Partial Snakeによるインパーフェクション共鳴のスピントラップ

Full Siberian Snakeによる克服

3. J-PARC大強度加速器における偏極ビーム加速

J-PARC加速器群は現在建設中であり、しかも当初に遂行される実験課題はニュートリノ振動実験や希崩壊現象に関わるもの予定され、その目的にあった加速器設計が進められている。そのような状況下で偏極ビーム加速の検討は時期尚早と考える向きもある。しかし、12GeV-PSにおいてもその建設時期から偏極ビームによる実験をというユーザーの要請があり、PS建設後共同利用実験が軌道にのったころ、まず偏極イオン源の開発から始まって、80年代初期の偏極ビーム加速プロジェクトへと繋がった経緯もあるように、今から話題にして検討を始めておいてもいいのではないと思われる。そうした要請もあってすでに2回のユーザーを交えた議論が行われた²。また、偏極現象国際会議において加速方式についての議論も行われた。

3- 1 偏極ビーム入射器

50GeV加速器への偏極ビーム入射としては

- 1) 通常行われるような、偏極イオン源→リニアック→3GeV-RCS→50GeV-PS がある。しかし、3GeV-RCS が高強度中性子源として主に稼働することを考えると共存は困難と予想される。
- 2) リニアックのエネルギーは当面 180MeV で建設が進んでいる。400MeV への早期復帰が行われても直接 50GeV-PS への入射は望めない。しかし、800MeV あるいは1GeV となれば、直接入射の可能性が出てくる。

3) 1GeV 程度の（あるいは 2GeV くらいあるとより望ましいが）FFAG を入射器として 3GeV-RCS とは別に設ける。この場合、リニアック、3GeV-RCS とはまったく独立に稼働できる。問題はどこに建設するかであり、場所の選定と大きさ（エネルギーに直接関係する）の検討が必要となる。

4) 以上のような偏極イオン源から減偏極しないように加速を継続していく方式とは別に、50GeV リングへの入射のところでレーザーにより偏極させる方式^[10]も案としてはありうるが、基礎的な開発課題がまだ多々ある。しかし、50GeV-PS において偏極実験が行われることが現実的課題になるまでのタイムスケールから考えれば、十分検討の余地はある。また H-ビーム入射の電子ストリップをレーザーにより行う開発^[11]が行われているが、ここから得られる知見の寄与も期待される。

3- 2 減偏極共鳴の克服

まずは、減偏極共鳴について知ることが必要であり、現在の加速器仕様に基づいたパラメーターによる減偏極共鳴の計算を行わねばならない。共鳴は、垂直方向のベータトロン振動に起因するイントリニシク共鳴と垂直方向CODに起因するインパーフェクション共鳴とがあり、それぞれ、 $\gamma G = nN \pm \nu_z$ と $\gamma G = nN \pm k$ の時に起きる。ここで、 γ はローレンツ因子、 $G = (g-2)/2$ (g はいわゆる陽子の g 因子)、 N はマシン対象性の数、 n は任意の整数、 ν_z は垂直方向ベータトロン振動数、 k は垂直方向CODのハーモニック数、である。J-PARC 50GeV-PSではマシン対称性が3であり、垂直方向のチューンは17.3-22.3であるから、数としては数十個のイントリニシク共鳴と約90個のインパーフェクション共鳴があることになる。これらの共鳴の中で強く減偏極を起こすようなものについての対策が必要とされる。

初期のマシンパラメーターによる計算では表1のような結果が得られている。3GeV-RCSではCODが十分に補正できていればインパーフェクション共鳴による減偏極は無く、イントリニシク共鳴もスピントラップし減偏極はしない。50GeV-PSではインパーフェクション共鳴はPartial Snakeで克服できると考えている。イントリニシク共鳴についてはいくつか強い減偏極が予想され、対策が必要となる。現状のマシンパラメーターによる減偏極共鳴の計算はミシガン大学やBNLの協力の下に進めているところである。

共鳴の通過には以下のような手法が考えられる。

チューンジャンプについては、AGSや12GeV-PSにおいて行われたように、パルス4極電磁石をインストールするのではなく、4極電磁石のファミリーの

² 2002年11月18,19日に宮崎で行われた”Italy-Japan Symposium on Origin of Nucleon Spin”

2003年5月27日に理研において行われたRHIC-SPINセミナー

中でチューンに支配的なファミリーの4極電磁石と電源をパルス化することで可能と考えられる。

R F ソレノイド、R F ダイポールについてはそんなに大きな装置ではないのでインストールする場所を探すことは可能と思われる。

Full Siberian Snakeを行いたいところであるが、偶数対象の位置に偶数個設置することが必要であり、3回対称性という加速器の制約から困難であろう。奇数対称性の加速器におけるSiberian Snakeの検討が要請される。2004年に行われた偏極現象国際会議においてT.Roser の提案した、120度対象な場所に強いPartial Snakeを置く方法^[12]は3回対象の加速器であるJ-PARCのリングについては大変に魅力的であり、今後の検討はこれを主として行っていくつもりである。設置場所も現時点ではあると判断している。

Snake 電磁石の製造に関しては、RHICにおける開発成果と実績が大きな参考になるし、理研から参画したチームがこれに大きな寄与をし、技術的蓄積があることが期待できる。

表 1：減偏極共鳴の計算例

Imperfection resonances in the 3-GeV RCS.

n	ϕ	E_p (GeV)	ϕ	P_f
			COD = 0.38 mm rms	
3	1.673	0.632	0.000139	0.998
4	2.231	1.155	0.000106	0.999
5	2.789	1.678	0.000123	0.999
6	3.347	2.202	0.000360	0.990
7	3.904	2.725	0.000947	0.931

Intrinsic resonances in the 3-GeV RCS (200 π mm rad at the injection).

	ϕ	E_p (GeV)	ϕ	P_f
-3 + ϕ	2.155	1.084	0.01173	-0.991
12 - ϕ	2.865	1.750	0.01474	-1.000
0 + ϕ	3.828	2.654	0.01662	-1.000

Strong intrinsic resonances in the 50-GeV PS.

	ϕ	E_p (GeV)	ϕ	P_f
			150 ϕ mm-mrad	
-9 + ϕ	4.675	3.448	0.00379	0.139
3 + ϕ	11.368	9.728	0.00350	0.236
9 + ϕ	14.715	12.868	0.00379	0.136
27 + ϕ	24.755	22.289	0.00258	0.539

4. まとめ

50GeVリングにおいて偏極ビームが可能となり、現実的課題になるには、他に偏極イオン源の開発や、加速器内部および取り出しラインにおけるビーム偏極度測定用のポラリメーターの開発、等の課題もある。また、議論されたような装置をインストールする場所についても、現時点での検討では問題ないと考えているが、コミッショニングへ向けての今後の議論の状況により新たな機器が設置され塞がる懸念がある。しかし、これも12GeV-PSにおける経験のように状況に応じ、撤去、設置を行うことになる。その場合には機器の放射化対策が最大の課題かもしれない。

その他の問題点としては、J-PARCはその目的が大強度ビームの加速である、にも関わらず偏極ビームの場合はビーム強度が低い。従って低いビーム強度に沿ったビームモニターの導入が必要となる。さらに、加速に関する問題ではないが、ビームラインの傾斜による垂直方向の偏向電磁石によるスピン回転に対する処置も検討課題となる。

現時点では関心・興味のある者の自主的なグループであるが、実績のあるRHICやミシガン大学の加速器研究者の協力を得て、国際的に検討を進めて行く機運は高まっている。

5. 参考文献

- [1] <http://www-ps.kek.jp/jhf-np/LOIlist/LOIlist.html>
- [2] 80年代、90年代のSPIN国際会議報告集
- [3] A Summary of Experimental Programs at the KEK-PS in 1980's, Edited by K.Nakai and T.Ohshima, 1990
- [4] Polarized Deuteron Beam Acceleration at the KEK-PS, H. Sato, et.al, Nucl. Instrum. Methods, A385 (1997)391
- [5] KEK Report 93-8 August 1993 A/H/R
- [6] The 20 Years of the Synchrotron SATUNE-2, Edited by A. Bouchard and P.A.Chamouard, World Scientific, 1998, ISBN 981-02-3697-4
- [7] SPIN2002国際会議, SPIN2004国際会議 (未発行)
- [8] PRST-AB.8.061001, Jun05, 2005, V.S.Morozov et., al. SPIN2004国際会議 (未発行)
- [9] UM HE 99-05, June 24, 1999
- [10] 大強度偏極ビームの可能性、平松、佐藤、ASN-237 Apr.17, 1985 (KEK-PS内部報告書)
- [11] I.Yamane, Feasibility of Laser Stripping via a Broad Stark State, 20th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity and High Brightness Hadron Beams
- [12] SPIN2004国際会議 (未発行)