

# J-PARC 加速器の現状と今後

KEK 加速器研究施設

内藤 富士雄

fujio.naito@kek.jp

2012 年 (平成 24 年) 11 月 19 日

## 1 序

J-PARC 加速器の震災からの復旧を中心にその後の運転実績と今後の予定などを含め報告する。ただし J-PARC の復旧のまとめは既に加速学会誌を含め多数報告されている [1, 2, 3]。どれも非常によくまとめられている。基本的な事柄はそちらを参照していただくことにして、筆者の個人的な立場で震災時とその後の J-PARC の状況をまとめてみた。従って内容が相当偏っていることをまずお断りしておく。

## 2 震災

本節では震災当日 (2011 年 3 月 11 日) と、その 2 週間後の様子、そして 1ヶ月後位までに加速器で行った作業を述べる。

### 2.1 当日 (その 1)

震災当日、私は広島方面の出張から帰る途中だった。新幹線で岡山あたりを通過中だったと記憶している。車内では東京方面で障害が発生し静岡-東京間で停止信号が出たため全ての車両を大阪で止める、というような放送があっただけで詳細は全く不明であった。大阪で全員降車したが状況が分からず、上り列車の再開を待っていた。しかし 2 時間ほど待ったが再開する様子もないため、あきらめて姫路まで戻った。関東方面で何か大事が起こったらしいということしか分からず、携帯電話で J-PARC のメンバーに連絡を取ったところ、偶然にもつながって地震があったことを知った。詳細はその晩に宿泊した姫路のホテルのテレビで分かった。

### 2.2 当日 (その 2)

J-PARC では当日の早朝にユーザーへのビーム供給が終わっていた。そして日中はビーム試験を継続していたリニアック以外では保守作業が開始されていた。MR でも地下トンネル内で作業が行われており、その最中に地震が起こった。作業者の MR トンネルからの脱出行が

ビデオで記録されており、WEB 上で閲覧できる [4]。このビデオから以下のことが分かる：

1. 30 秒程度の停電後、非常電源がしっかり作動し照明が戻った。
2. 脱出は途中にあった非常脱出口ではなく、少し離れた通常の出入り口からなされた。

まず 1 から、非常用機器がもくろみ通りにうまく動作したことが分かる。そして 2 からは非常口を実際に用いた訓練が不十分だったことが考えられる。ただし、そうは言っても全員が冷静に素早く対処したおかげで職員を含む全作業者にも実験ユーザーにも一人のケガ人も出さずに済んでいる。これは非常に素晴らしいことである。そして当日は東海に留まらざるを得なかった多数の海外からの研究者も 3 月 13 日までに全員つくばや東京等に移動させることができた。

### 2.3 震災後 2 週間

最初の 2 週間、東海村の原科研の一般職員は自宅待機で、危険防止のため入構も禁止であった。余震が頻発していた。東海村のほぼ全域が断水状態であり下水管の破断もあった。原科研内でも一部では電気が利用できたが、加速器施設は全域停電していた。構内には簡易トイレが設置されていた。

人的被害がなかったことは先に述べた。しかし加速器の被害がどの程度なのか、特に地下トンネル内の状況がどうなっているのか非常に気になっていた。そのため、震災 1 週間後の 3 月 17 日に数名の原科研メンバーが許可を得てリニアック地下トンネルに入って様子を覗いていた。その時は床に 1 cm 程度地下水が溜まっていたが空洞は架台上に並んでいて大きなダメージは観察されなかったと報告されている。

震災後、私が最初に原科研に入ったのは 3 月 23 日である。その日はリニアック棟の地上部 (クライストロンギャラリーや機械室) の調査を行った。クライストロンギャラリーに隣接する部屋にあった私の実験機はパソコ

ン共々崩れ落ちた壁板に埋もれていた。ギャラリーの床は亀裂が入り、自覚できるほど傾いていた。天井クレーンの走行用レールが曲がっているのも目視できた。外部では建家周囲の盛り土部分が沈下していた。場所によっては1.5 m位沈んでしまい、その場に埋めてあった配線や配管が全て切断されていた。(図 2.3 参照)



図 1: リニアック玄関。

玄関周囲は陥没。地中にあった配線、配管が切断された。陥没箇所は緊急避難場所。(撮影：筆者)

実際の被害は結構大きかったが、遠目には大きなダメージは J-PARC の建物に見つけられなかった。原科研敷地内での震災の規模を明確に示す例としては、図 2 に示す折れた煙突がある。これはグーグルが撮影した写真である [5]。J-PARC リニアックのすぐ北側にあった大きな煙突の上部約 1/3 の部分が地震で折れて地面に突き刺さっていた。共振モードの節の部分で折れたのかもしれない。近づけないので正確な寸法は不明だが、煙突の直径は 3 m 位ではないだろうか？

翌 3 月 24 日に私も含めて数名がリニアックの地下トンネルに入った。トンネル内の漏水量は劇的に増えていて、床の水は深いところで 15 cm 以上溜まっており(図

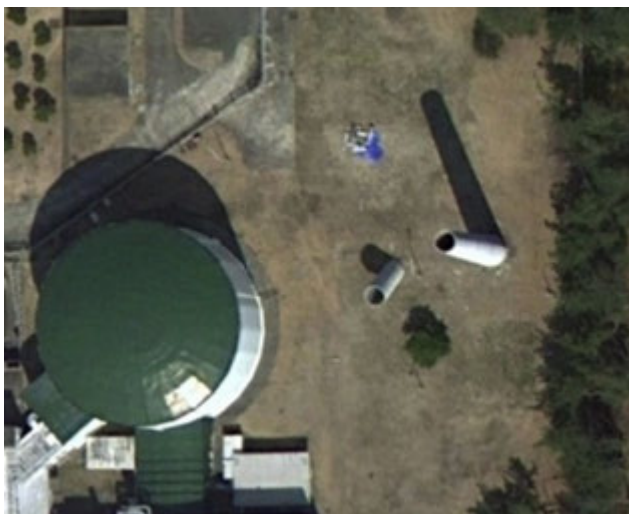


図 2: 折れた煙突：グーグルアースの写真



図 3: リニアックトンネル内の様子。

床面は地下水に覆われている。停電中。左側がリニアック空洞。(撮影：筆者)

2.3), 更に床からわき出していた。従って床に置いてあった真空ポンプは部分的に浸水し、ビームモニターのアンプ類は水没していた。空洞と磁石は 1 週間前と変わらずしっかりと架台上にあったが、空洞間の真空ダクトがつぶれていて全ての空洞内は大気暴露されていることが判明した。湿度は非常に高く、室温も暖かかった。この空気に空洞内面が長期間さらされた場合の表面劣化は致命傷になりかねないので、すぐに発電機を調達し翌日からポンプで排水を開始した。トンネルからくみ上げた水の水素イオン濃度 (pH) は 11 程度と非常に高いアルカリ性を示した。そのため、近隣各所から調達した硫酸で中和してから排水した。

その後、RCS と MR でも各担当者による地下トンネル内の目視検査が行われたが、漏水は(リニアックほどではないが)両リングでも起こっていた。MR の一部の磁石は天井から降り注ぐ地下水でずぶぬれになっていた。こういう磁石にはビニールカバーを掛けて当座をしのいだ。

施設全体が停電しているため換気ができず、すべての加速器建家の内部は多湿の状況になっていた。本来ならば外気を導入し、いくらかでも建家内を乾燥させたかった。しかし原発事故の影響で外部の非管理区域の放射線濃度の方が J-PARC 内部の放射線管理区域より高くなっていたので、管理区域の汚染を防ぐため外気の導入は禁止された。

## 2.4 震災後 1ヶ月

震災後 1ヶ月間の各部での作業であるが、地下水の溜まったリニアックの動きが最も活発であった。とにかく水をくみ上げ、空洞を乾燥窒素に置換する事を急いだ。以下は備忘録的な各部の 1ヶ月間の作業記録である。

### 2.4.1 リニアック作業

3/17 トンネル入城

- 3/24 トンネル浸水確認
- 3/25 発電機設置。揚水開始。PH11 確認。硫酸調達 (~3/26)
- 3/26 水位下がる
- 3/30 トンネル内照明点灯 (日中のみ), 点検 (目視, 真空等) 開始
- 4/1 除湿器 (トンネル内) 6 台設置, 空洞内窒素置換開始
- 4/6 トンネル内床清掃開始, イオン源 HV 耐圧試験 50 kV, OK。排水継続中

2.4.2 RCS 作業

- 3/24 トンネル止水工事開始
- 3/29 発電機 200 V 用意
- 3/30 電灯制限して点灯開始 (発電機)
- 4/1 トンネル内機器目視検査。健全そうに見える。
- 4/6 BT 真空試験。リング真空試験。大リークは無し。

2.4.3 MR 作業

- 3/31 真空リーク探し, 水ぬれ磁石の防水対策継続。
- 4/5 主電磁石目視検査, 全 BPM 調査。RF 空洞 Z 測定。
- 4/5 機械室 M2, ハドロン及びニュートリノ区画の換気開始。換気区画のみ, H=30%, T=21°C。他は H=70%, 22°C。

2.5 復旧工程

建家の被害は大きかったが、加速器の構成要素（磁石、加速空洞、リングの真空ダクトなど）は見えそうなことが震災後 1ヶ月程度過ぎた段階で分かっていた。建家修理は応急処置ですませ、機器のアラインメント作業と壊れたモニターの修理等を急ぎ、年内にビームを出すという方針が 4 月上旬に固まりつつあった。この予定にはユーザーからの早期再開への強い要望と、MLF の予算基盤である共用促進法からの要請が大きく影響している。5 月に発表された復旧工程が図 4 である。即ち、12 月にビームを出し、1 月からビーム利用を開始する。

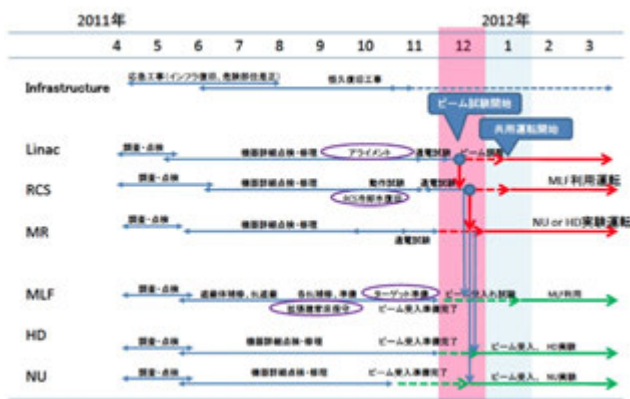


図 4: J-PARC 復旧予定 (平成 24 年 5 月)

震災で大きく工程を変更せざるを得なかったのが、リニアックの 400 MeV 増強工事である。本来は 2012 年夏に



図 5: リニアック 400 MeV 増強工程案  
ケース 1: 元の予定, ケース 2: 変更後の予定

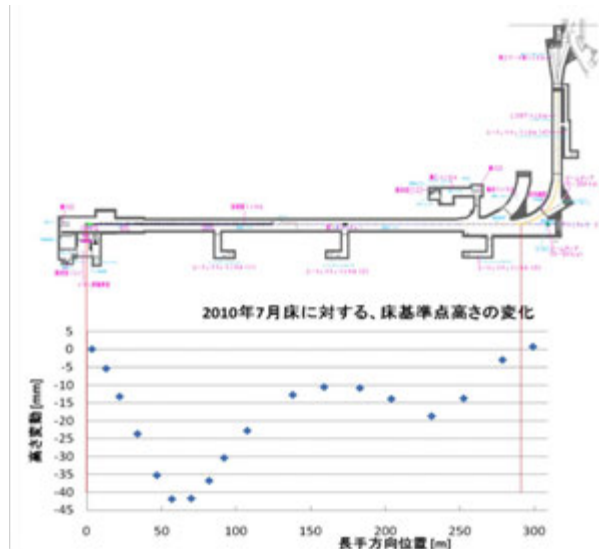


図 6: リニアック地下トンネル床の基準位置  
縦軸は震災前との差を示す。

ACS 空洞を設置してリニアックのエネルギーを 181 MeV から 400 MeV に上げる予定で、空洞の量産と大電力試験を行っていた。しかしリニアック棟内のクレーン修理と大電力試験区画の復旧に 1 年程度の時間がかかりそうなことから、設置工事を 1 年延期して 2013 年にすることにした。50 mA 用 RFQ の設置が 2013 年の予定であるため、RFQ と ACS を同時に設置して工事期間を減らしビーム供給時間を増やす意味もあった。図 5 のケース 1 が元々の予定、ケース 2 が新しい予定である。

3 加速器の歪みと修復結果

加速器の構成要素は地下トンネル内床面の基準プレート上に設置されている。従って、建物自体が歪んだ場合には例えば床にしっかりと固定されていても、建物にならって加速器自体の配列も歪む。各部がどの程度歪んだか、そして修復後はどうなったかを以下まとめる。

3.1 リニアック

地下トンネルの床基準面の高さの測量結果を震災前との差で示したのが図 6 である。上流から 50 m 程度のところが以前と比べて 40 mm ほど低くなっていて、この位置でトンネルが折れたように見える。リニアックの地





図 7: リニアック地下トンネル部 (縦断面)  
 左側が上流部で、岩盤 (黒) に乗っている。  
 右の最下流部は杭を打っている。

下トンネルの直線部の長さは約 300 m である。トンネルの床下は砂地であり、最上流部のみが岩盤に接している。そして最下流部は杭でやはり岩盤から支えられているが、途中は岩盤に接していない。その模式図を図 7 に示す。床下の砂地部分が地震でゆり、トンネルの中央部で支えが不十分になった結果、そこで折れ曲がり亀裂が入ったのではなかろうか。その亀裂から地下水が吹き出した。

床の漏水は特殊な樹脂をコンクリートに流し込むことにより止まったが、トンネルの折れ曲がり直せない。床面に関係なくリニアック全体を 1 直線上に再配列することは原理的には可能であるが、非常に長い作業期間が必要で、前述の復旧工程に間に合わない。そこで DTL 部とその下流の SDTL 部は別の直線に合わせることにした。再アラインメント後の空洞と磁石の位置測定結果を図 8 に示す。途中の曲がり角は 1 mrad 程度なので、軌道補正可能で支障ないことはビームシミュレーションで事前確認している。そして、実際のビーム加速で検証した。

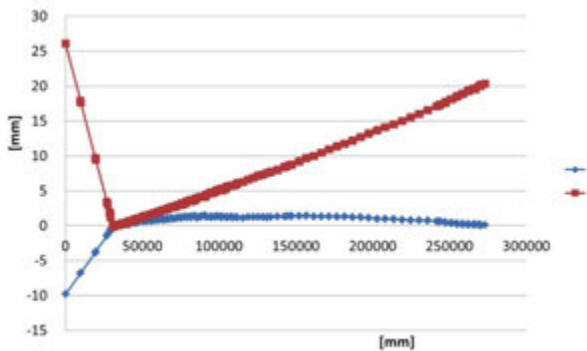


図 8: 再アラインメント後の空洞と磁石の位置  
 四角：垂直方向 菱形：水平方向

### 3.2 RCS

ほとんどの加速器メンバーが最も危惧したのが、RCS のセラミックビームダクトの損傷である。なぜならば、予備品が殆どなく、再製作に長期間かかる特注品だからである。調査の結果、幸いなことにダクトは無事である

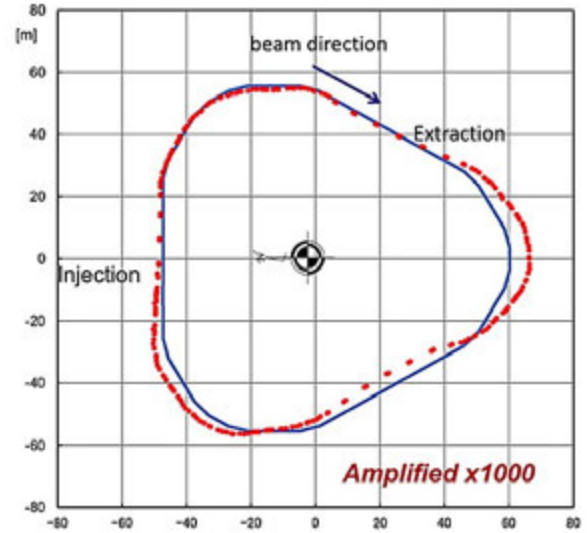


図 9: RCS の磁石位置 (半径方向)  
 滑らかな線 (青) は設計位置、点線 (赤) が測定値

事が判明した。ただし磁石の位置はずれていた。測量結果 (図 9) を基に行ったビームシミュレーションの結果は、ビームパワーが約 300 kW 程度ならリング中でのビーム損失を許容値内に押さえ込めるが 600 kW 以上では無理なことを示した。即ち入射エネルギーが 400 MeV になり RCS 出力 1 MW を目指す時までは磁石の再アラインメントを行わずに運転できるわけである。従ってリニアックエネルギー増強工事期間の 2013 年夏に並べ直すことにした。それまでに詳細な位置 (磁石だけでなく、ダクトと磁石の関係も) を測定しアラインメントの準備を行う。

### 3.3 主リング

主リング (MR) は周長が 1600 m 弱の大きさがあり、リング全体が砂地に浮いた形で岩盤からの直接の支えはない。MR 地下の岩盤層の深さを示したのが図 10 である。昔は川が海に流れ込んでいたところで、地下 50 m 近くまで固い箇所はない。MR の床面レベルは海拔マイナス 2.1 m である。幸い MR の建物は非常にしっかりしていたため、地震に耐え、全体が多少歪んだ程度で済んでいる。そして歪んだ箇所からは前述の様に漏水があった。当然のことながら、建物の歪みにより磁石の位置がずれた。

磁石の測量結果が図 11 である。この図は半径方向の位置を示す。測定結果を用いたビームシミュレーションの結果から、RCS の場合と異なり全磁石をアラインメントし直さねばまともなビーム加速は出来ない事が分かった。そこで 2 組の作業班を組みアラインメントを実施した。いくつかの磁石では、架台の位置調整器具の可動範囲を超えて動かす必要があり、架台の手直しも実施

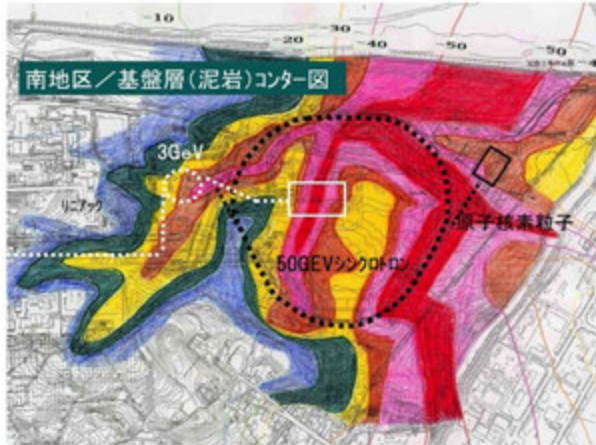


図 10: MR 周囲の地下岩盤深度  
MR は昔の谷にせり出したような配置になっている。

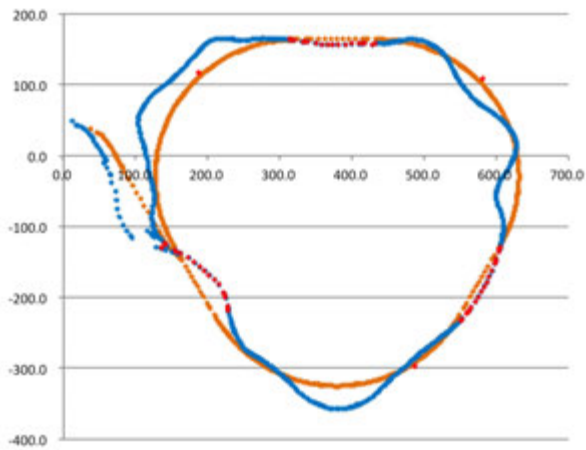


図 11: MR トンネル内磁石位置 (震災後)  
数字の単位は (m)。滑らかな線 (橙) が設計値。うねっている線 (青) が測定値であり、1000 倍してある。

した。再アラインメントの結果を図 12 に示す。

## 4 2012 年の運転状況

### 4.1 MLF とニュートリノ標的へのビーム取り出し

本格的なビーム利用は 2012 年の 1 月から再び開始された。その後、加速器の調整を繰り返し順調にビーム強度を増やしていった。今年の夏までの MLF とニュートリノ標的へのビーム供給履歴を図 13 と図 14 に示す。

図 14 をよく見ると、夏前の最後では 200 kW から下がって 160 kW 程度になっている。加速器本体の問題ではなく、地上にある機械室の排気中の放射線濃度が高くなったので、規定値を超えないようにビーム強度を抑えたからである。本来ビーム運転中は地下トンネル内の空気は循環モードであり、トンネル内空気の外部への漏れ

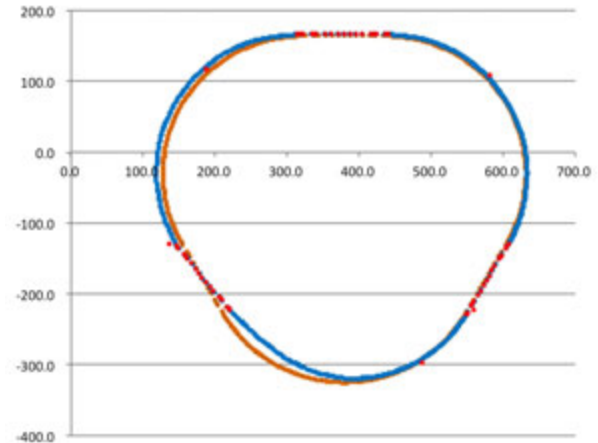


図 12: MR トンネル内磁石位置 (再アラインメント後)  
数字の単位は (m)。左上で内側の線 (橙) が設計値, 外側の線 (青) が測定値 (1000 倍) である。

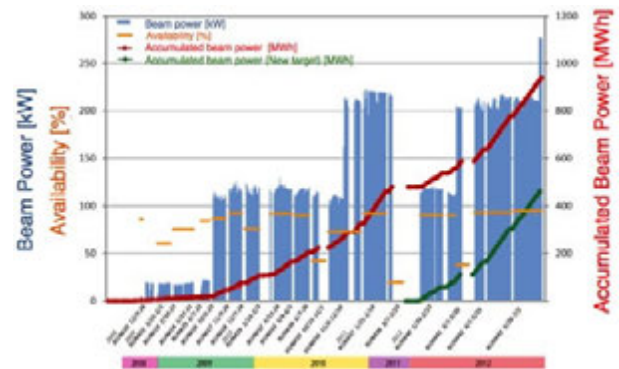


図 13: MLF へのビーム供給量の履歴

棒グラフがビームパワー。上側の曲線 (赤) が蓄積ビームパワー

は十分に抑制されていなければならない。そこで機械室内での空気漏れ箇所を調査した結果、換気ダクトにふたをするダンパーの気密が不十分な事が判明した。そして問題のあるダンパーを夏の保守期間に交換した結果、機械室からの排気の放射線レベルはバックグラウンド程度になり、11 月上旬には約 200kW の連続運転を行うことができた。

2012 年 11 月 12 日に一旦ビーム利用を終了し、RCS のビーム出力を 600 kW にする試験期間に入った。RCS への入射ビームエネルギーが 181 MeV (ピーク電流: 30 mA) の場合、RCS からの出力 (MLF への最大入射ビーム電力) は 600 kW になり、現時点で可能な最大パワーとなる。これは 400 MeV (ピーク電流: 50 mA) 入射時の 1 MW 出力に対応する。

調整が続けられ、実際の試験は 11 月 18 日に行われた。加速器内でのビームロス、イオン源の寿命そして中性子標的の冷却性能などを考慮して時間を 35 秒に限定して実施し、MLF の中性子標的に 534 kW のビームを

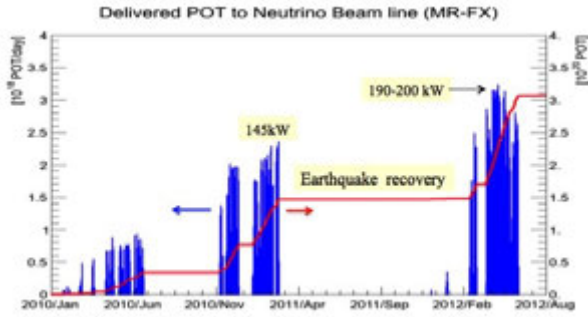


図 14: ニュートリノ 標的へのビーム供給量の履歴 (2012 年 7 月 2 日までの状況)

入射できた。RCS 内での蓄積ビーム粒子数の時間変化を図 15 に示す。一番上の線が加速終了時 534 kW に相当する。残念ながらイオン源出力が不足し 600 kW に達しなかったが十分なビーム出力で試験ができた。つまり来年度リニアックのエネルギーを増強し 50 mA イオン源の設置を行えば、RCS で 1 MW ビームの加速が可能なのが確認されたわけである。もちろんリング中でのビームロスを減らすため、前述したように磁石の再アライメントは必須である。

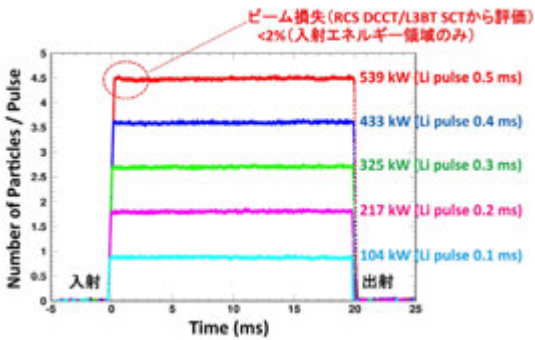


図 15: RCS 600 kW 加速器試験時の DCCT 出力  
リニアックのビームパルス幅を増やしていった。

MLF における 1 パルス辺りの発生中性子数は図 16 にあるように既に SNS や ISIS とほぼ同じであり、1 MW 時は圧倒的に大きくなる。ユーザーは十分期待して良い。

#### 4.2 ハドロン実験ホールへのビーム取り出し

最後にハドロン実験ホールへの遅いビーム取り出し (SX) の状況を簡単に述べる。ハドロン実験区画も大きく被災した。取り出しビームラインやハドロンホールのシールドブロックは全て再配列され、建家の修理も行われた。震災後の最初のビームが 2012 年の 1 月に取り出され、システムの健全性が確認された。そういった状況を考慮して、今後の SX のビームパワーを図 17 に示すような工程で増強していくこととした。

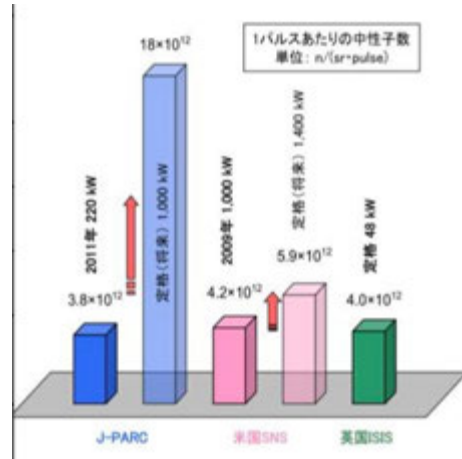


図 16: 1 パルス辺りの中性子数 SNS 及び ISIS との比較

Periods	Expected beam power	Improvements
2011. 6-11	shutdown	SX collimator
2011. 12 - 2012. 6	3-6 kW (14 kW for study)	
2012. 7 - 9	shutdown	- Titanium endplates for magnetic septa - New strip-line kicker for transverse rf of 100 MHz/3kW
2012. 10 - 2013. 7	> 10 kW (50 kW for study)	
2013.8 - 2014. 1	shutdown	Titanium chambers for ESS
2014. 2 - 2014. 6	~ 50 kW (100 kW for study)	

図 17: MR 遅い取り出しの予定

今年の夏前の SX-RUN で実際に得られたビームパワーの履歴を図 18 にしめす。6kW で定常運転を行いながら、途中で試験的に一度 13kW までビームパワーを上げて 10kW 以上での定常運転に見込みをつけた。

SX の場合、ビームパワーだけでなく取り出しビームの平坦度も重要である。この平坦度の指標であるスピルはまだ 30%程度であるが、その後スピル補正用に早い Q 磁石の電源整備を含めいくつかの対策を実行しているので、50%近い値にまずは到達できるだろう。もちろん加速器側は今後も改善のため開発は続けるが、実験側の腕の見せ所でもあるのではなかろうか？

## 5 まとめと今後の予定

震災後の加速器の復旧は予定通り行えた。しかし震災直後に多湿の環境下に長くおかれた結果、回路系の不具合が多数出ている。更に明確に震災の影響と断言はできないが、通常は故障しないような機器の故障も頻発している。

そういった故障に対処しながらもリニアックと RCS は来年度のリニアックビームエネルギー増強の準備を進めている。来年の 8 月から半年間が工事期間である。通常夏の保守期間は 7 月からであるが、出来る限り多くの





図 18: SX ビームパワー履歴

ビームをニュートリノ標的に供給するため、工事開始を通常より1ヶ月遅らせて8月からとしている。

その時にMRではコリメータ増強やビームダクトのチタン化等のビーム損失対策を進め、より強いビームを全てのユーザーに供給できるように開発を進めている。更にMRのビーム加速の繰り返しは今年の10月から2.48秒(夏前は2.56秒)になったが、それを更に短縮(2.40秒、できれば2.32秒)して出力ビームパワーを更に増加させていく予定である。

## 参考文献

- [1] 小関忠, 長谷川和男, 金正倫計, 加速器学会誌, Vol.8 No.2 (2011) 74
- [2] 長谷川和男, 物理学会誌, Vol.8 No.2 (2011) 1
- [3] <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/20120308170000/>
- [4] <http://www.youtube.com/watch?v=hA15P0jG0jc>  
<http://www.youtube.com/watch?v=rnfHCYqVB84&feature=relmfu>
- [5] グーグルアースは震災後の3月末に津波の押し寄せた海岸付近の全域を走査したようだ。J-PARCの周囲の地面の陥没などは良く観察できた。突き刺さった煙突は不安定で危険なので、横倒しにされている。最近のグーグルアースではその様子が見られる。