



資料2
科学技術・学術審議会
大強度陽子加速器施設評価作業部会（第2回）
令和5年11月24日

令和5年度 J-PARC中間評価

第2回 作業部会

前回中間評価の主な指摘事項に対する対応(1)

令和5年11月24日

J-PARCセンター

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
一般財団法人 総合科学研究機構 中性子科学センター



中間評価にあたっての主な論点について

第1回作業部会 資料2「中間評価にあたっての主な論点について」

(1) 前回中間評価(平成30年6月)の指摘事項への対応状況

① 評価のまとめより

施設の整備・運用	1. 国際競争の状況や財政環境、施設の効率的な整備・運用等も考慮した中長期的な戦略の検討も含めた、十分なビームタイム確保と、所期目標のビーム強度の早期達成・出力増強に向けた取組状況はどうか。	第2回 作業部会
	2. 生命科学用実験装置の整備について、重要な研究開発課題やイノベーション創出を加速する仕組等の検討状況はどうか。	
施設の運営	3. 施設運営に「経営的視点」を取り入れ、経年劣化対策や更なる財源の多様化、施設の高度化に向けた重点投資等を一体的に検討した中長期的な経営計画を策定し、施設の経営基盤を強化しているか。	第3回 作業部会
	4. J-PARCとしての一体的な組織運営やオープンアクセスの推進の検討状況はどうか。	
中性子・ミュオン利用の振興	5. 日本全体の中性子・ミュオン利用の振興に係る課題(成果創出、人材育成、産業利用、国際化など)について、大学、施設、企業等の組織横断的に議論する場を提供し、その中核として主導的役割を果たしているか。	
	6. MLFにおける共通基盤技術等の一元管理、定型業務の外部委託、共用ビームタイム枠の導入など、利用者の利便性向上に資する取組状況はどうか。	
	7. JRR-3、中・小型中性子源等の他施設との連携によるコミュニティ全体としての施設間の申請課題の連携、人材育成等の検討状況はどうか。	
施設安全	8. IR(論文分析を含めた研究力分析、ベンチマーク)による研究組織評価や、MLFの特長を適切に評価できる指標の検討を行い、課題審査等に活用しているか。	
	9. 安全文化の醸成、安全管理体制の不断の見直し、地元住民・国民全体からの理解促進、J-PARCが広く開かれた施設となるような活動状況はどうか。	
将来に向けた高度化等	10. 将来的なニーズや国際動向を見据えた施設・設備の高度化や施設の更なる効率的利用方法等についての検討状況はどうか。	第2回 作業部会

中間評価にあたっての主な論点について

第1回作業部会 資料2「中間評価にあたっての主な論点について」

②その他指摘事項

○ 競争領域と非競争領域の研究開発を柔軟に実施できる体制の整備も含めた「組織」対「組織」の本格的産学連携	第3回 作業部会
○ 高度な解析サービスの導入等の学術・産業の利用者視点に立ったサービス提供	
○ ミュオン施設の整備状況（Sライン・Hラインの整備推進）	第2回 作業部会
○ ハドロン施設の整備状況（学術コミュニティのニーズを踏まえた整備計画の推進）	
○ 核変換施設の整備状況（技術蓄積等の基礎研究、国際協力や計算科学の活用等のより合理的・効率的な進め方の検討状況）	
○ 国際研究拠点となるための方策	第3回 作業部会
○ 高度研究人材の育成や利用者の開拓、異分野研究との連携の促進	
○ 費用対効果の高い広報の実施	
○ 登録施設利用促進機関の取組状況	
○ 共用施設における評価指標の検討	

(2)その他指摘事項

○ 既存施設の高度化	第2回 作業部会
○ 老朽化対策	第3回 作業部会
○ 経済安全保障、戦略分野(半導体・GX・DX・CE等)の推進	
○ 物価高・燃油高騰への対応	

中間評価にあたっての主な論点について

評価項目		ID	資料の対応のページ	
施設の整備・運用	1. 国際競争の状況や財政環境、施設の効率的な整備・運用等も考慮した中長期的な戦略の検討も含めた、十分なビームタイム確保と、所期目標のビーム強度の早期達成・出力増強に向けた取組状況はどうか。	運用	加速器:	10、11、12、14、15
			MLF:	17、18
			ニュートリノ:	36
将来に向けた高度化等	10. 将来的なニーズや国際動向を見据えた施設・設備の高度化や施設の更なる効率的利用方法等についての検討状況はどうか。	高度化	全体計画:	7、8、43
			加速器:	12、13、14、15
			MLF:	19、20、21、22、23、24、25、26、27
			ニュートリノ:	36、37
その他指摘事項	○ ミュオン施設の整備状況(Sライン・Hラインの整備推進)	その他①	MLF:	26、27、28、29
	○ ハドロン施設の整備状況(学術コミュニティのニーズを踏まえた整備計画の推進)	その他②	ハドロン:	31、32、33、34
	○ 核変換施設の整備状況(技術蓄積等の基礎研究、国際協力や計算科学の活用等のより合理的・効率的な進め方の検討状況)	その他③	核変換:	40、41、42
	○ 既存施設の高度化	その他④	MLF:	19、20、21、23、24、25、28、29、36、37、38

前回中間評価の主な指摘事項に対する対応(1)

施設の整備・運用／将来に向けた高度化

1. 全体概要
2. 加速器施設
3. 物質・生命科学実験施設(MLF)
4. ハドロン実験施設
5. ニュートリノ実験施設
6. 核変換実験施設
7. まとめ

施設の整備・運用／将来に向けた高度化



J-PARCの現状と将来(LI/RCS/MLF/核変換)

現 状

- 設計強度ほぼ達成
- Availability>90%, 毎年標的交換
- 21ビームライン／23ビームポート(中性子)
- 8エリア／4ビームライン(ミュオン)

今後めざすところ

TS1における成果の最大化

2030年までに実験効率2倍を目指す

- 1MWでの高稼働率の実現
- 標的の高度化
使用済み標的減容化
標的長寿命化 (交換頻度:1年→2年)
- ビームラインの高度化及び新設の検討
- Hライン拡張→ミュオン顕微鏡、g-2実験

TS2の実現(2030's)に向けて

- RCS 1.5MW 実現
- タングステン標的等開発
- 施設設計
など

核変換

- 陽子ビーム照射と多様なニーズに対応可能な実験施設の検討とその実現へ向けた取り組み

MR加速器

- 初期設計性能750 kW 1shot成功

ハドロン実験施設

現 状

- ~64 kW定常運転実現
- 現行プログラムの着実な実施

今後めざすところ

- 100 kW定常運転実現
- 回転標的を導入
更に大強度化
- ハドロン実験施設拡張

ニュートリノ実験施設

現 状

- 540 kW定常運転
- CP対称性の破れ 優位度~90%

今後めざすところ

- 750kW定常年度内目指す
- T2K: CP対称性 2026までに
~3 σ を目指す
- 2027~ 約1.3MW &
HyperKamiokande 開始
CP非保存発見を目指す

施設の整備・運用／将来に向けた高度化

2. 加速器施設(リニアック、RCS、MR)



リニアック・RCS性能向上

30時間程度の利用運転
は2020年6月に達成

500 kW (1) ビーム出力向上

1 MW (2) 安定性向上

(3) ビーム出力向上
>1 MW

(1) ビーム出力向上

- ビームロスの低減、ビームの高品質化
- ・計算コードの高度化、ビームモニターの高精度化
- ・イオン源出力ビームの高品質化、高周波空洞制御の高度化、電磁石電源の低リップル化、リニアック低エネルギー部の高度化、...

主に、ビームの高品質化

(2) 安定性向上

- 機器の高度化
 - ・RCS高周波空洞の高度化、...
- 運転の高効率化
 - ・機器調整の自動化、故障予知システムの導入、等

主に、運転の高効率化

(3) ビーム出力向上

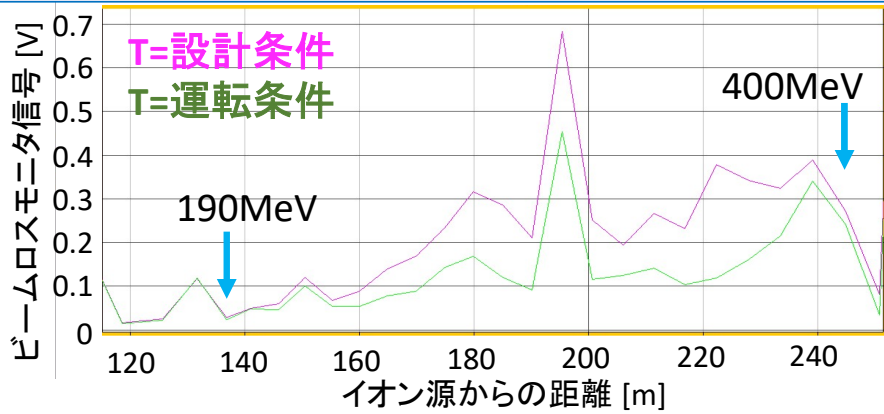
- 機器の性能向上
 - イオン源の大電流化、ビーム輸送・マッチング機器の性能向上...
- ビームロスの低減

ビームの高品質化・運転の高効率化・次世代のための要素開発

- 目標稼働率
 - 2024: > 90%
 - 2028: - 95%

次期中長期計画	'19 R1	'20 R2	'21 R3	'22 R4	'23 R5	'24 R6	'25 R7	'26 R8	'27 R9	'28 R10
ビームの高品質化	→					→				
運転の高効率化	→									
次世代のための要素開発	→					→				

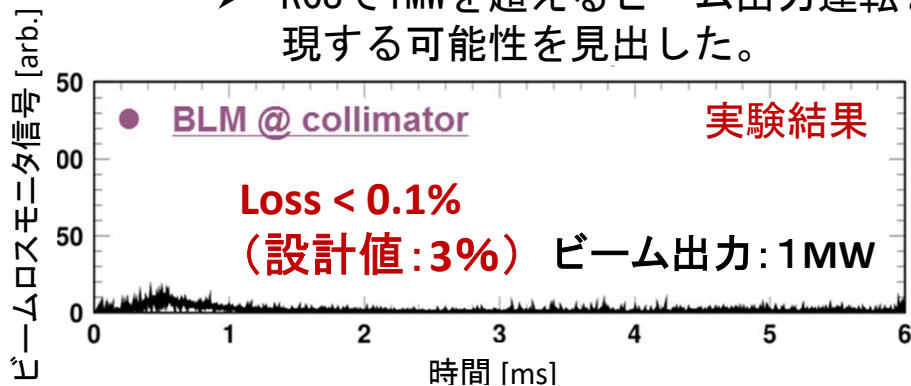
リニアック：高エネルギー部のビームロス在设计値から40%低減を達成。



図：リニアック高エネルギー部のビームロスモニタ信号

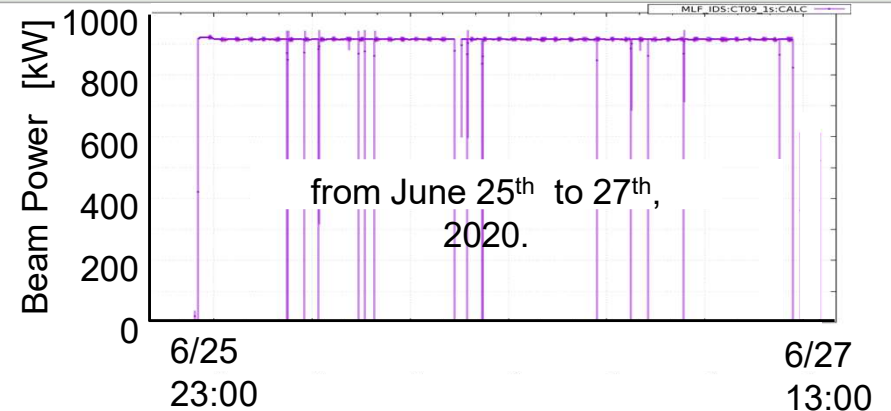
RCS： 10^{-3} オーダーの非常に低いビーム損失で1MWのビーム運転を達成。

- ビーム実験と数値シミュレーションを繰り返し行い、さらにいくつかのハードウェアの改良
 - 10^{-3} オーダーの非常に低いビーム損失での、1MWビーム運転を達成。
 - RCSで1MWを超えるビーム出力運転を実現する可能性を見出した。



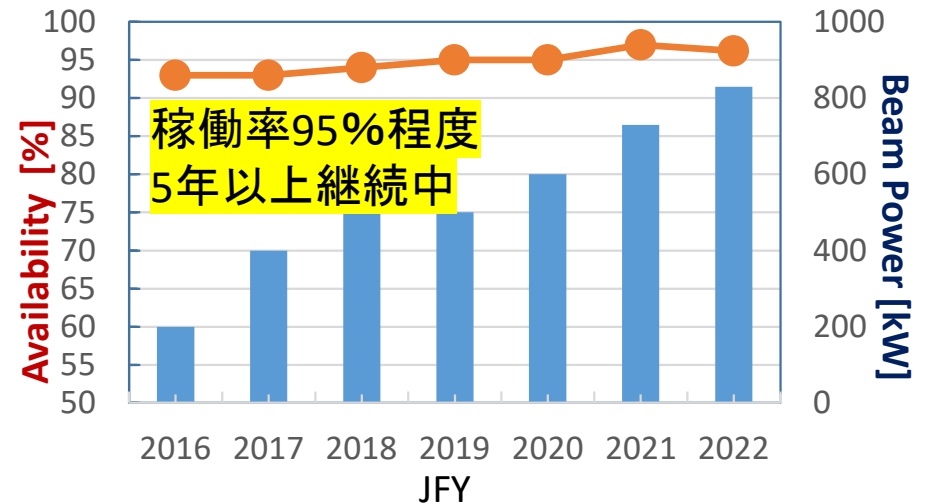
図：コリメタでのビームロスモニタ信号

高稼働率での1-MW ビーム運転: 達成



1MWのビームをRCSからMLFに**38時間**、高い稼働率(**~94%**)で取り出すことができた。

高稼働率ビーム利用運転: 達成

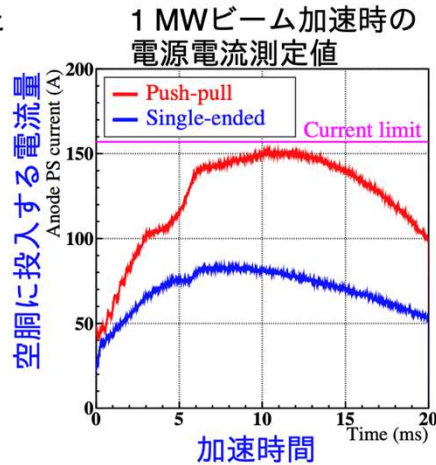


図：MLFユーザー運転時のビームパワーと稼働率

- EPS-AG IPAC'20 ACCELERATOR PRIZES (The Gersh Budker Prize)
- 2020年度高エネルギー加速器科学奨励会 諏訪賞

● RCS 低消費電力高周波加速空洞の開発

加速器トンネルにインストールした
シングルエンド型加速空洞



プッシュプル型
消費電力: 820 kW
↓
4割削減に成功
シングルエンド型
消費電力: 487 kW



- 低消費電力高周加速空洞に順次置き換え予定。全数で12台。
- 課題である、高周波加速空洞用終段アンプの真空管冷却能力不足が解消できる。

12台全て置き換えると(現在3台、2028年9月予定)、年間約4億円の電力料金削減見込み

● 高効率高周波源の開発

出力とコレクタ

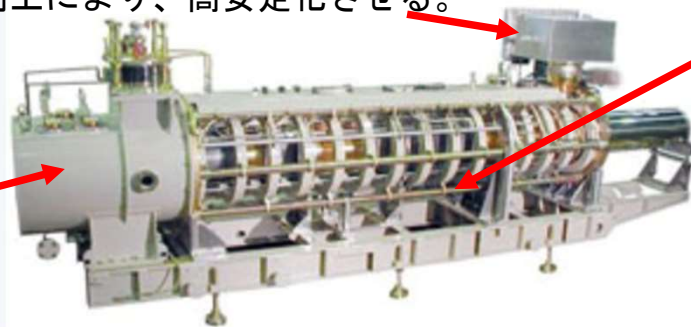
放熱性の向上により、高安定化させる。

キャビティ

マルチキャビティとマルチビームにより、出力効率を向上させる。

電子銃

放電の抑制により、高安定化させる。



	Present	New
Max. Outputs	3 MW	> 3.6 MW
Max. efficiency	55%	> 66%
Pulse width	650 us	> 750 us

● 半導体パワースイッチの開発

真空管タイプ

- ・カスタムメイド
- ・輸入品
- ・短寿命

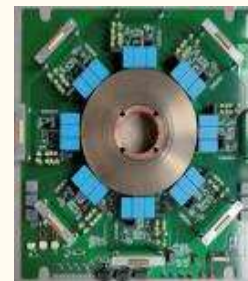


サイラトロン



イグナイトロン

水銀の使用により、生産中止

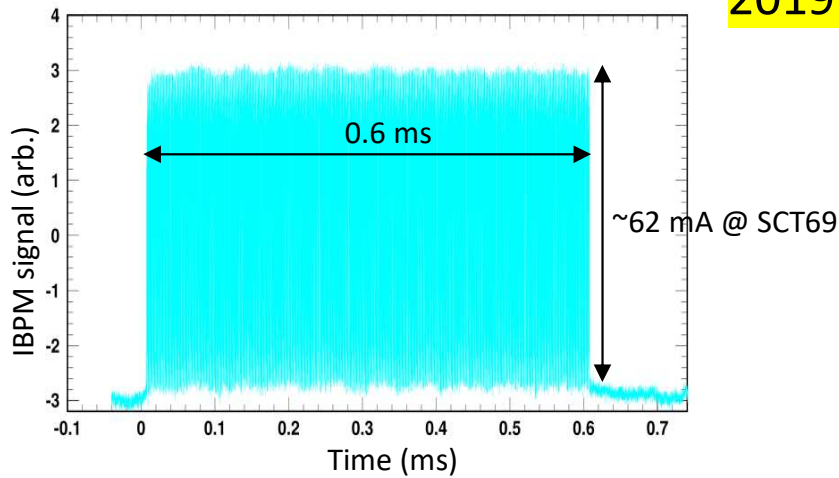
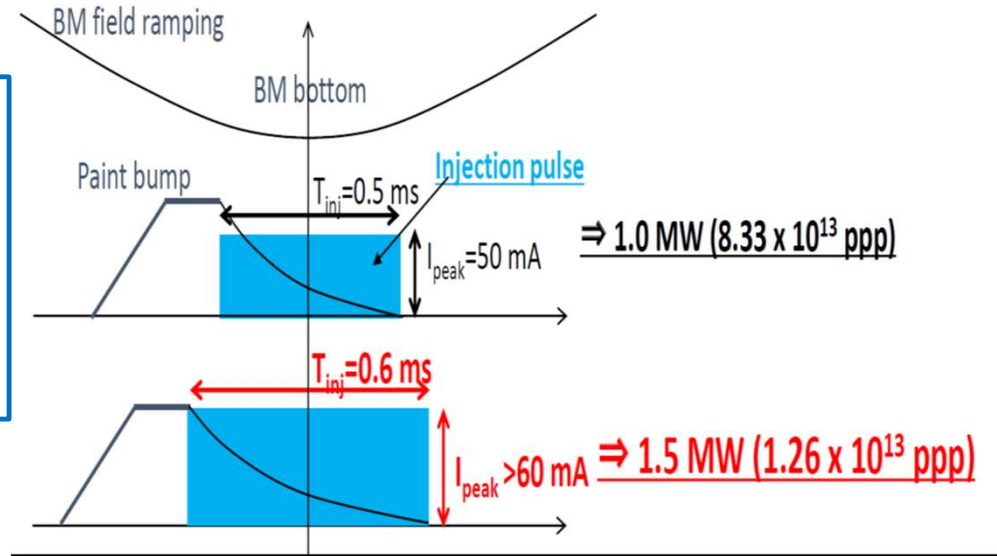


32モジュールを積み上げ
→ 40kV/2kA 達成



将来に向けて-RCSでの1.5 MW相当のビーム加速試験-

- 1MWを超える高出力ビームに向けて
 - 入射ピーク電流とパルス長を増加させたビーム試験を実施
 - ピーク電流 50 mA ⇒ >60 mA
 - パルス長 0.5 ms ⇒ 0.6 ms



2019年12月

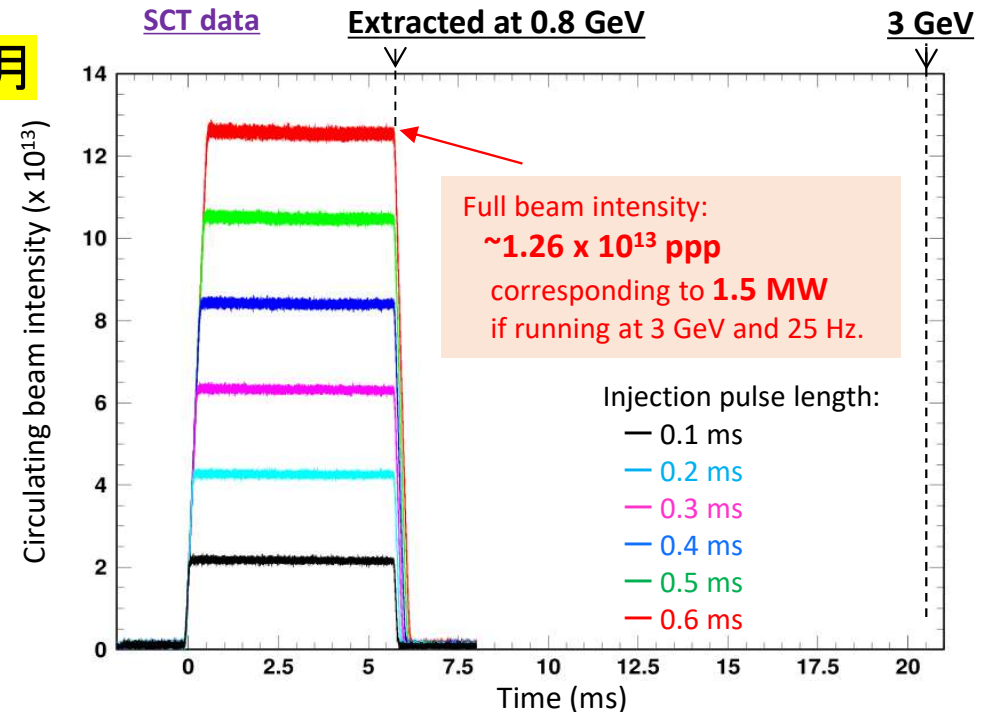


図: RCSに入射された、リニアックで加速されたビーム信号

図: RCSで加速された陽子数

● 主な実施項目

1. 電源の高度化 (2020-2022で実施)
 - ✓ 高繰り返し化
 - ニュートリノ施設へ: 2.48秒 → 1.36秒
 - ハドロン施設へ: 5.2秒 → 4.24秒
 - 2022年から新電源による運転開始。安定化に向けて調整中。

2. 高周波加速システムの増強
 - ✓ 2022年から4年間で実施予定
 - 2023年夏作業で、750kWを安定加速に必要な最低限のシステム増強実施。

3. コリメータ追加
 - 2023年夏作業で実施。最後の7台目を設置 (容量: 2kW → 3.5kW)

目標: 1.3 MW

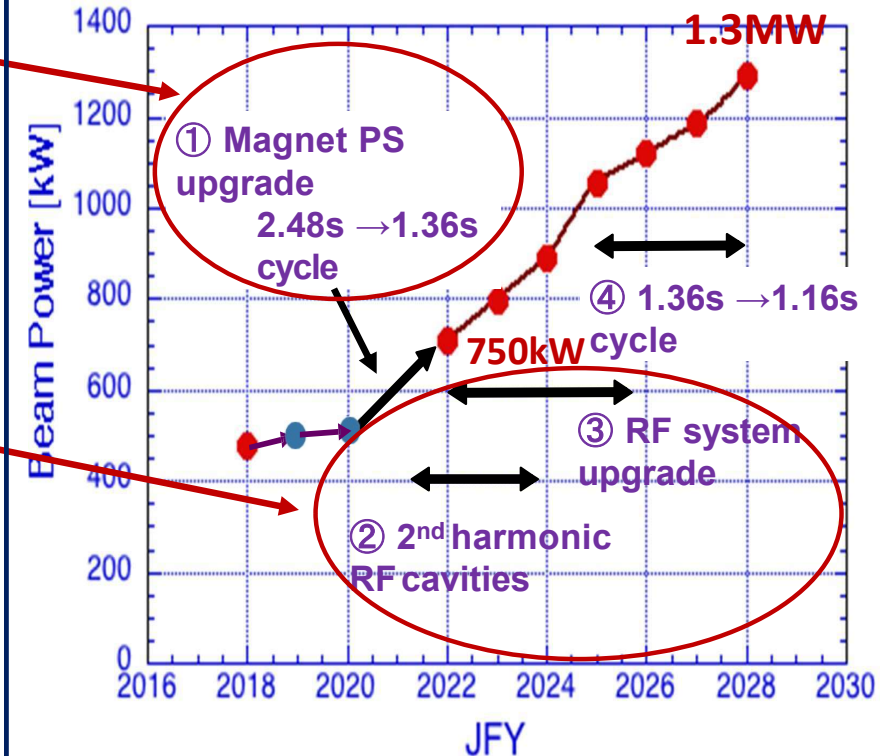


図: MRビーム増強シナリオ



図: 新規製作した電源



図: トンネルに設置した高周波加速空洞

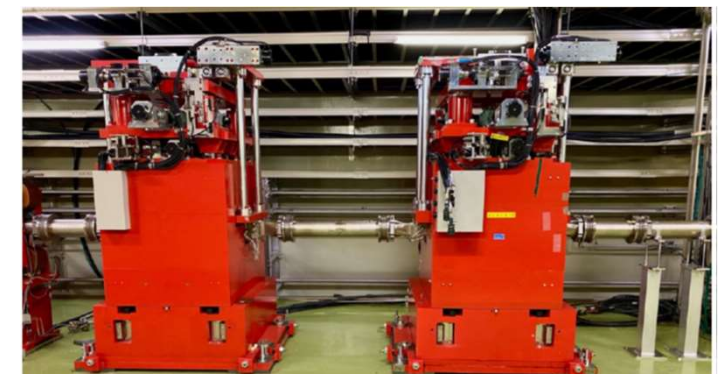
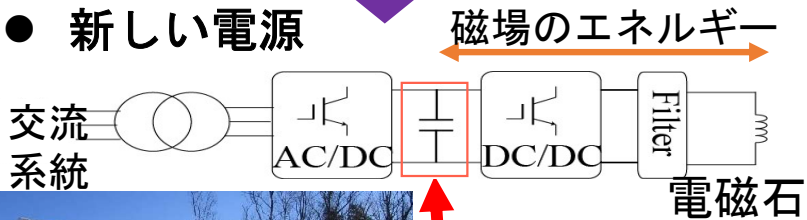


図: トンネルに設置したコリメータ

● これまでの電源



● 新しい電源



コンデンサー

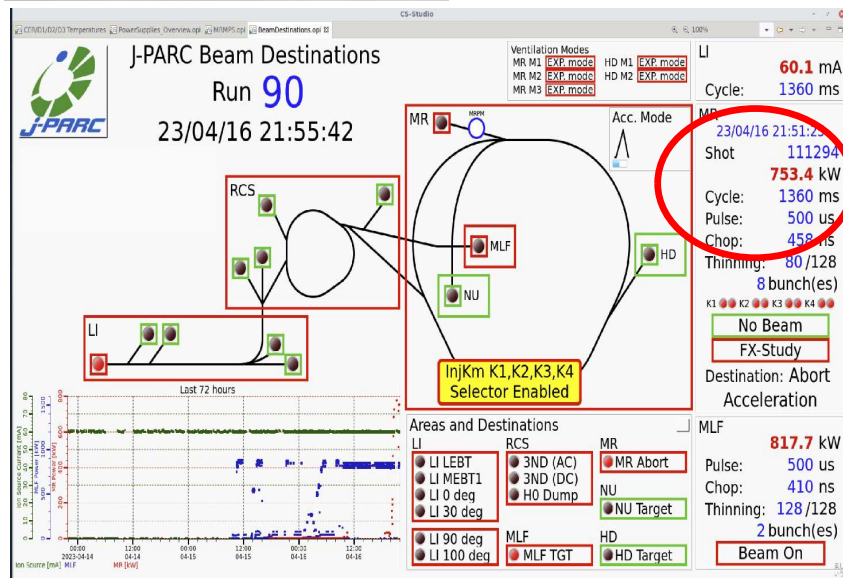


図: 750kW相当の陽子ビームを加速時の制御画面

新電源の特長

- これまでの電源
 - ・ 交流システムに戻す→大きな電力変動
 - ✓ この状態で、繰り返しを速くすると、電力会社の許容範囲を超える。
 - 同じ回路では高繰り返し化は不可
- 新電源
 - ・ コンデンサーバンクで、磁場のエネルギーを回生
 - 交流システムに戻さない
 - 交流システムの変動小、コンデンサーに貯めた電力を再利用
 - 電力効率の向上期待！

- 令和5年4月16日 21時51分
J-PARC MRが、試験運転(1-shot運転)において、**所期性能である750 kW相当の陽子ビームの30 GeV加速に成功**

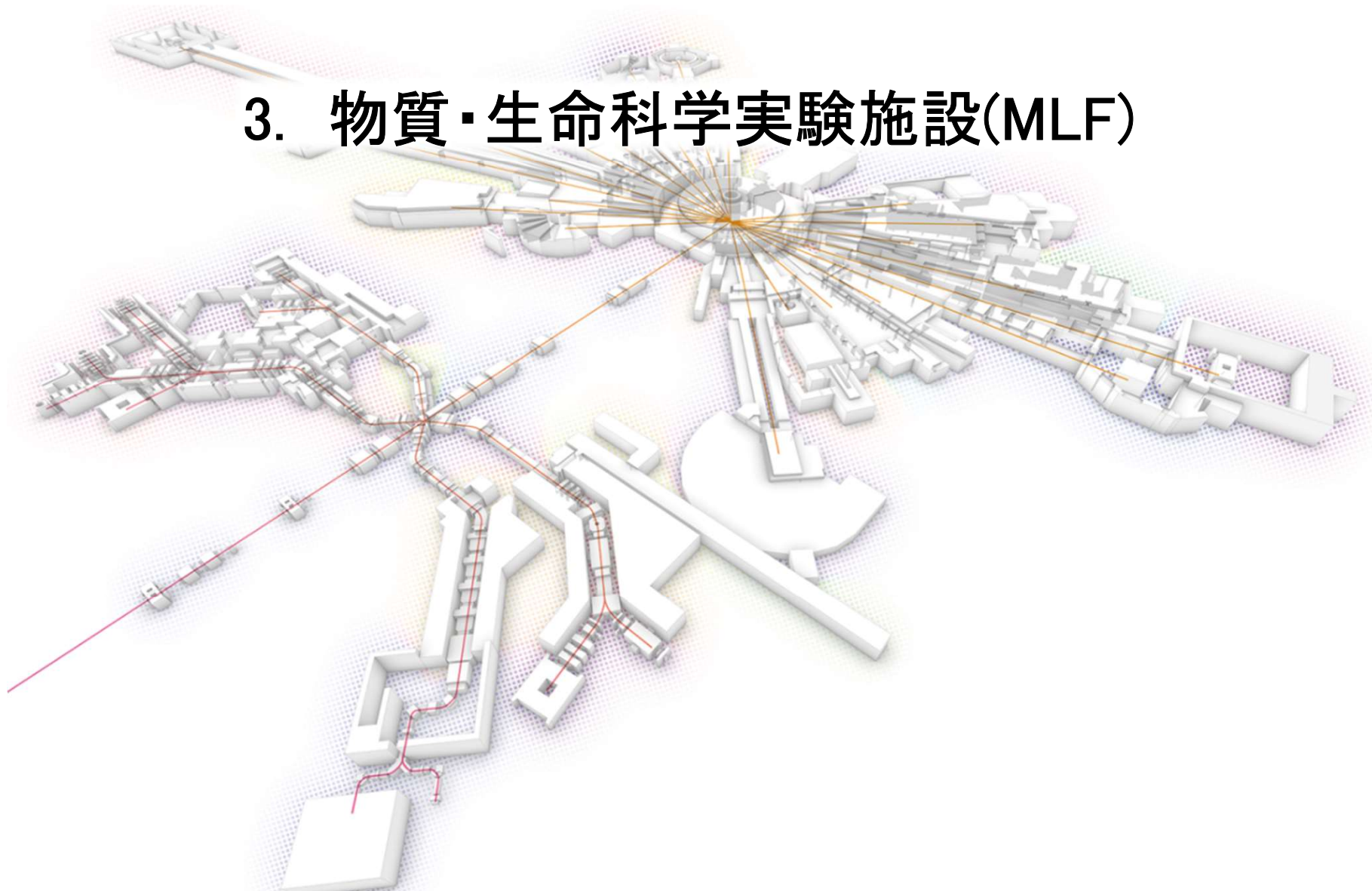
- 今夏にRF空洞一台を増設。その後、ビーム試験を重ねてビームロスの低減を図りながら利用運転時の陽子ビーム強度を徐々に増加。➡ 750 kW以上の**定常運転**を目指す

	繰り返し	ビームパワー	電力 (実測)
2021年	2.48秒	512kW	18.9MW
2023年	1.36秒	753kW	17.7MW

効率が1.5倍に向上

施設の整備・運用／将来に向けた高度化

3. 物質・生命科学実験施設(MLF)

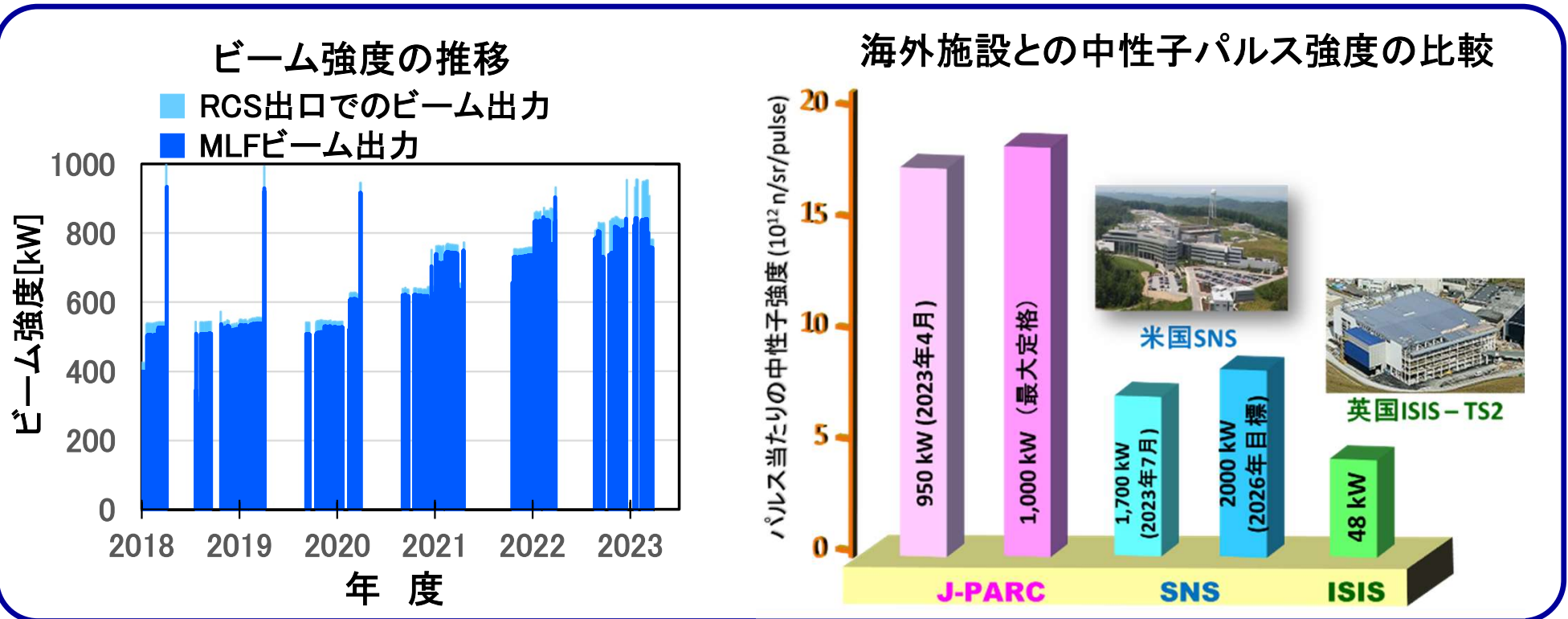


1MWに向けたMLF中性子源のビーム強度増強の実績

利用者への安定なビーム供給を考え、2018年度から段階的にビーム強度を増強してきた。

- 2018年度: 500 kWから 2023年度は840 kWへ(平均ビーム強度)
 - 各年度とも運転期間中は、95%程度の高い稼働率を達成
 - 1 MW 相当のビーム強度による連続試験運転: 1h(2018), 10.5h(2019), 36h(2020)
- ⇒ 2023年度はパルス当たり1MW程度の強度で利用運転を実施

2018年度から2023年度6月までのビーム運転履歴



中性子標的容器の耐久性向上のための微小気泡注入技術開発

中性子標的容器
(SUS 316N)

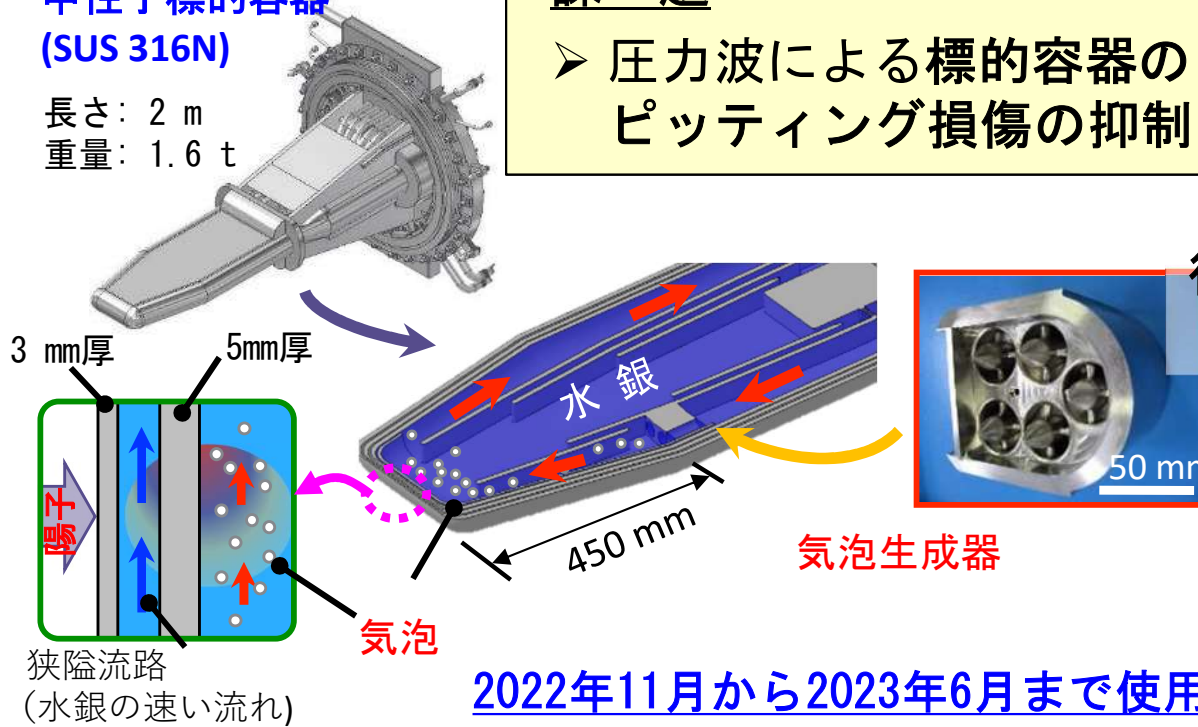
長さ: 2 m
重量: 1.6 t

課題

➤ 圧力波による標的容器の
ピitting損傷の抑制

取組

➤ 水銀中への微小気泡注入量を増やし
圧力波の抑制性能を高める



従来型標的容器 (2021年6月まで)
気泡生成器を前面から450 mmに配置

現在 (2021年下期~2023年上期)
気泡生成器を92mm 前方に移動

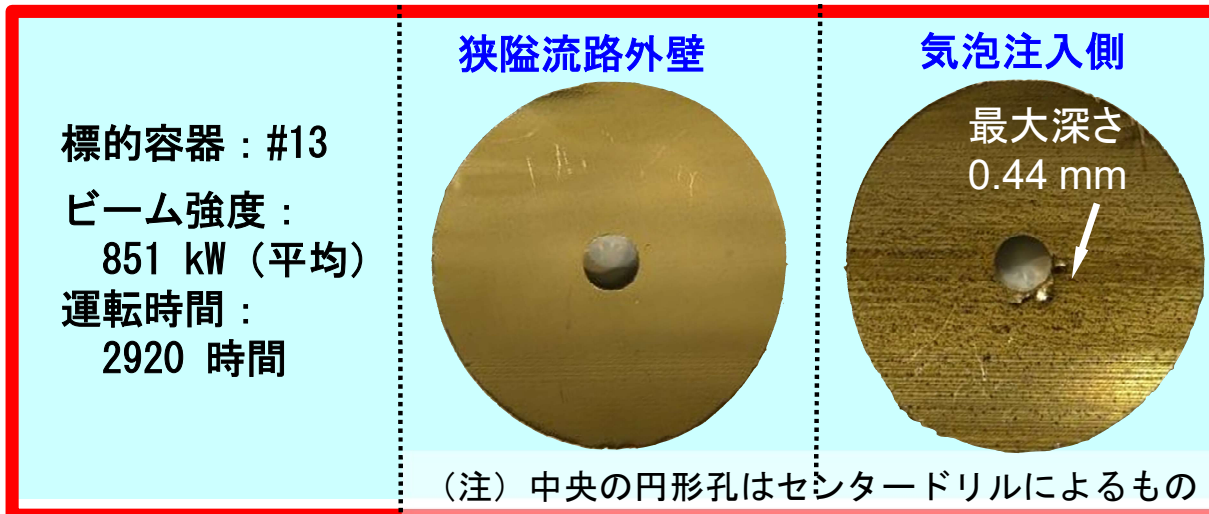
2022年11月から2023年6月まで使用した標的容器の損傷の観察結果

- 水銀容器外側壁は目立った損傷はない
- 水銀容器内側の損傷深さは、850 kW運転時で 0.44 mm (板厚 5 mmに比べて十分浅い)

成果

過去の実測値を元にした予測で

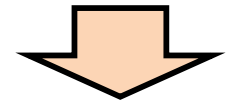
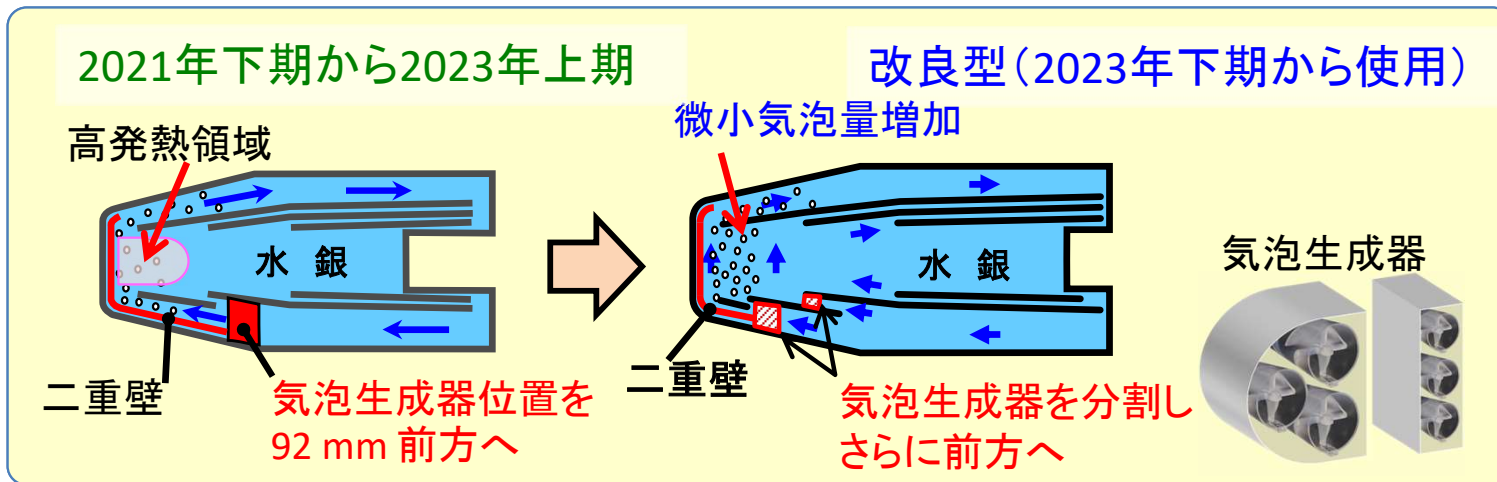
**設計目標の 1 MW、5,000時間
運転の耐久性を見込む**



• 気泡生成器の開発 成果 : 二川他、2014年度日本機械学会賞 (技術) 受賞
米国 ORNL・SNSとの国際協力を活用し、水銀で実験的研究を実施

中性子標的容器のピッチング損傷の抑制能力を現在から更に高める改良

- 気泡生成器を容器前方へ移動し、陽子ビーム入射部近傍の微小気泡体積分率を増加
 - 気泡生成器の抵抗係数を調整し、水銀の流量配分を最適化
 - 陽子ビームが気泡生成器に当たらない位置を選定し、発熱による応力を抑制



設計目標:

1MW、2年運転

(10,000時間)

関連する取組

- 機械学習を用いて更なる気泡生成器等の最適化、気泡条件の改良
(国内大学との共同研究を活用)
- 容器材料の照射後特性を確認し、耐久性の向上
(米国SNS等との国際協力を活用)

▼ 現在

年度	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
パルス強度 (kW)	860	830	950	950	1000	1000 (目標)	1000 (目標)
主要なマイルストーン		改良型標的容器の使用開始	標的容器の2年運転開始	分解型標的容器の製作開始 ▼	標的容器の損傷計測も実施	分解型標的容器の使用開始	

中性子源の持続的な安定運転を目指す高度化(2)

使用済中性子標的容器の保管スペースの逼迫

中性子標的容器
重量: 1.6ton
交換周期: 1年~2年

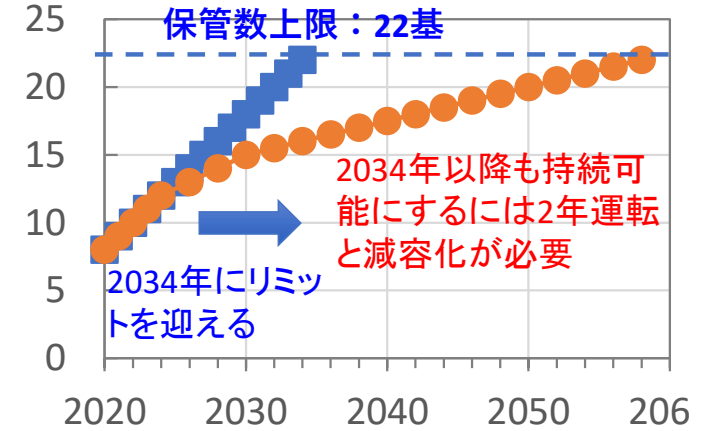


遮蔽容器
に収納

一時保管・冷却(30年以上)

使用済み標的容器の
遮蔽容器(50t)

地下ピット
(深さ4.4m)



- 使用済み標的容器を保管廃棄施設へ引き渡すには30年以上の冷却期間が必要。
- 使用済み標的容器はMLFとRAM棟に合計22基が保管可能であるが、1年毎の容器交換を続けると2034年、今後2年毎の交換に移行しても2044年には保管スペースが限界に達する見込み。

分解型標的容器の開発による減容化



- 線量が特に高く、水銀や放射性核種など慎重な取扱を要する水銀容器を切り離す。
- 従来型の半分以下まで減容可能の見込み。
- 保管スペースが限界に達する時期の更なる延伸を目指す。

- 2022年度で構造解析による健全性評価がほぼ完了。遠隔操作による分解シナリオや必要機器の検討を実施中。
- 今後、遠隔操作方法、分解した低放射化部の保管、輸送等の検討を進め、2025年度からの製作開始を目指す。

現行ターゲットステーション(TS1)の高度化による成果最大化

サイエンス

- 極限環境下の振動励起・磁気励起・スピン揺動
- 極限環境下・オペランド環境下における軽元素の状態解明
- 高分子やタンパク質の構造とダイナミクス
- 中性子顕微鏡、ミュオン顕微鏡による実空間観察
- 中性子・ミュオン基礎物理

BL改造・新規BL

- BL07, 13 建設
- Scrap & Build

推進コアの構築

- 偏極中性子利用
高エネルギー中性子偏極
- 解析環境
情報科学導入、リモートアクセス
- 試料作製・SE機器
重水素化ラボ、多重極限環境

“MLF-double” program

- 実験室建屋
試料周辺機器整備スペース
機器仮置スペース
空調能力向上
- 長寿命ターゲット
予測精度向上
メンテ作業期間の短縮

強靱なインフラ整備

- モデレータ最適化
- ガイド管最適化・追加
- 検出器増設
- 検出器高分解能化

大強度化・高分解能化

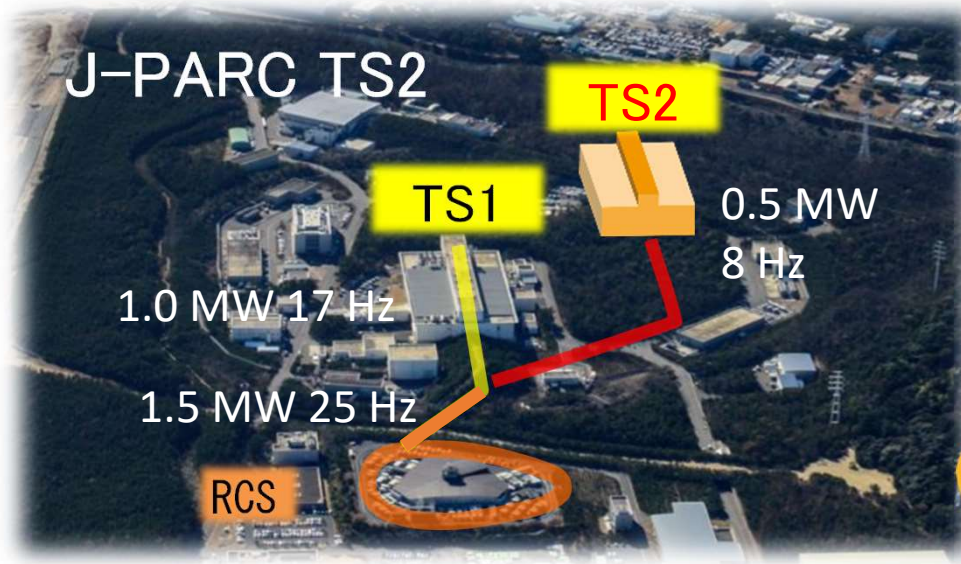
- 線源部の最適化計算
- 線源内へのガイド管設置
- ミュオン取出ソレノイド

TS2を見越したR&D

2030年までにTS1での実効的強度2倍を目指す

MLFの将来計画(中・長期)

世界初の中性子・ミュオンを一体化した新たなターゲットステーション(TS2)の実現



2030年代の実現を目指す



TS2の高輝度中性子/高強度ミュオン微小ビームを用いたサイエンス

トポロジカル絶縁体の表面における偏極電子スピンの流

中性子EDM
ミュオン精密測定

ソフトマターやタンパク質のダイナミクス

ドーパント(活性サイト)周りの構造

電子透過像 (薄片試料)
電子透過像 (バルク試料)
ミュオン透過像 (バルク試料)
三次元再構成

細胞イメージング

実用システムのイメージング

中性子回折イメージング

地球マントルの構造解析