



令和2年度 高エネルギー加速器研究機構技術職員シンポジウム
2021年1月21日10:00 オンライン

東北大学マイクロイオンビーム 自動収束システムの技術開発

三輪美沙子^{1*}・遠山翔¹・松山成男¹・永谷隆男¹・藤澤政則²

¹ 東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻

² 東北大学大学院工学研究科電子情報システム・応用物理学科

「高度技術系専門職員を目指すには」
に興味をもち、
発表させていただくことをお願いいたしました。

機会をいただきありがとうございます。

大学で働く一技術職員が感じる、
専門性の必要性をお伝えしたいと思っています。

1. 東北大学技術職員の組織
2. 東北大学高速中性子実験室のご紹介
3. 実験室職員の仕事内容
4. マイクロイオンビーム自動収束システムの開発
5. 高度技術系専門職員を目指すには

東北大学は、
10の学部
16の大学院
6つの附置研究所
があります。

教育・研究系技術職員は、自然科学系を中心とした25の部局で専門を活かして働いています。その数は417人。

職群：
技術職員をそれぞれの専門に基づいて部局横断的に組織化したもの。

→電子回路・測定・実験群
→工学部・工学研究科
高速中性子実験室の技術スタッフ

	加工・開発群	加工・開発群では、大学の最先端研究や教育に必要な実験装置やガラス器具の設計・製作、また既存装置の改造などを行っています。 詳細
	電子回路・測定・実験群	実験のための電子回路の設計・制作、実験試料の作成、大型装置を用いた計測、理工系研究室の支援などが主たる業務です。 詳細
	分析・評価・観測群	実験データの分析・解析・評価や、自然現象(地震・海洋等)の観測などを業務とし、教育・研究の高度支援を行っています。 詳細
	生物・生命科学群	動物施設・植物施設の管理、生物実験材料の採集・飼育・供給、遺伝子・細胞培養などの生物・生命科学関連の研究支援を行います。 詳細
	情報・ネットワーク群	電子メールなどの情報サービスやネットワークの運用管理、プログラム開発、広報、知財管理などを業務としています。 詳細
	安全・保守管理群	労働安全衛生、放射線管理、液体ヘリウム・液体窒素の製造と装置の運転・管理、大型設備の保守管理を主な業務とする職群です。 詳細

施設の場所

東北大学工学部・工学研究科青葉山キャンパス



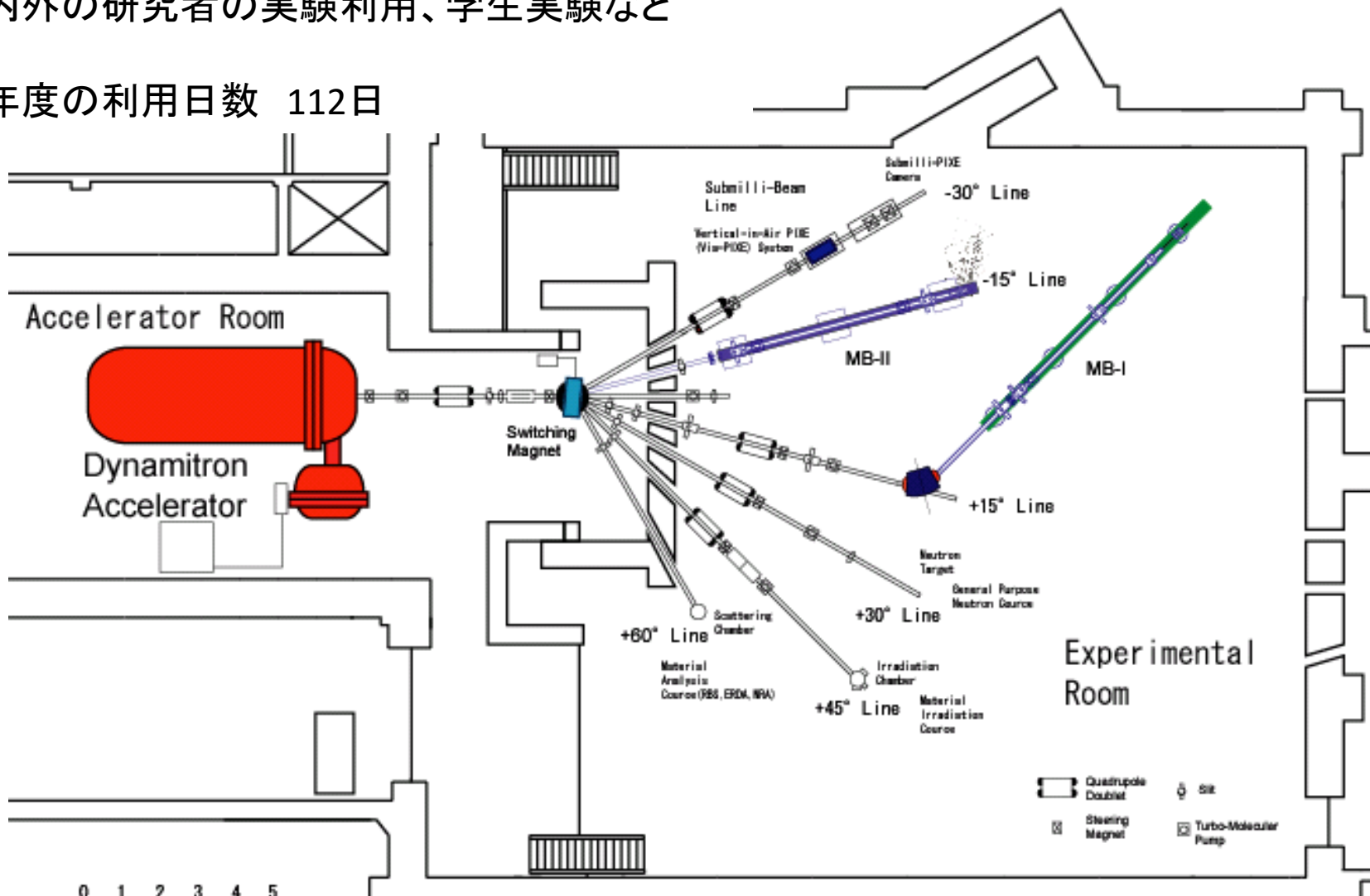
ここ

高速中性子実験室



学内外の研究者の実験利用、学生実験など

今年度の利用日数 112日

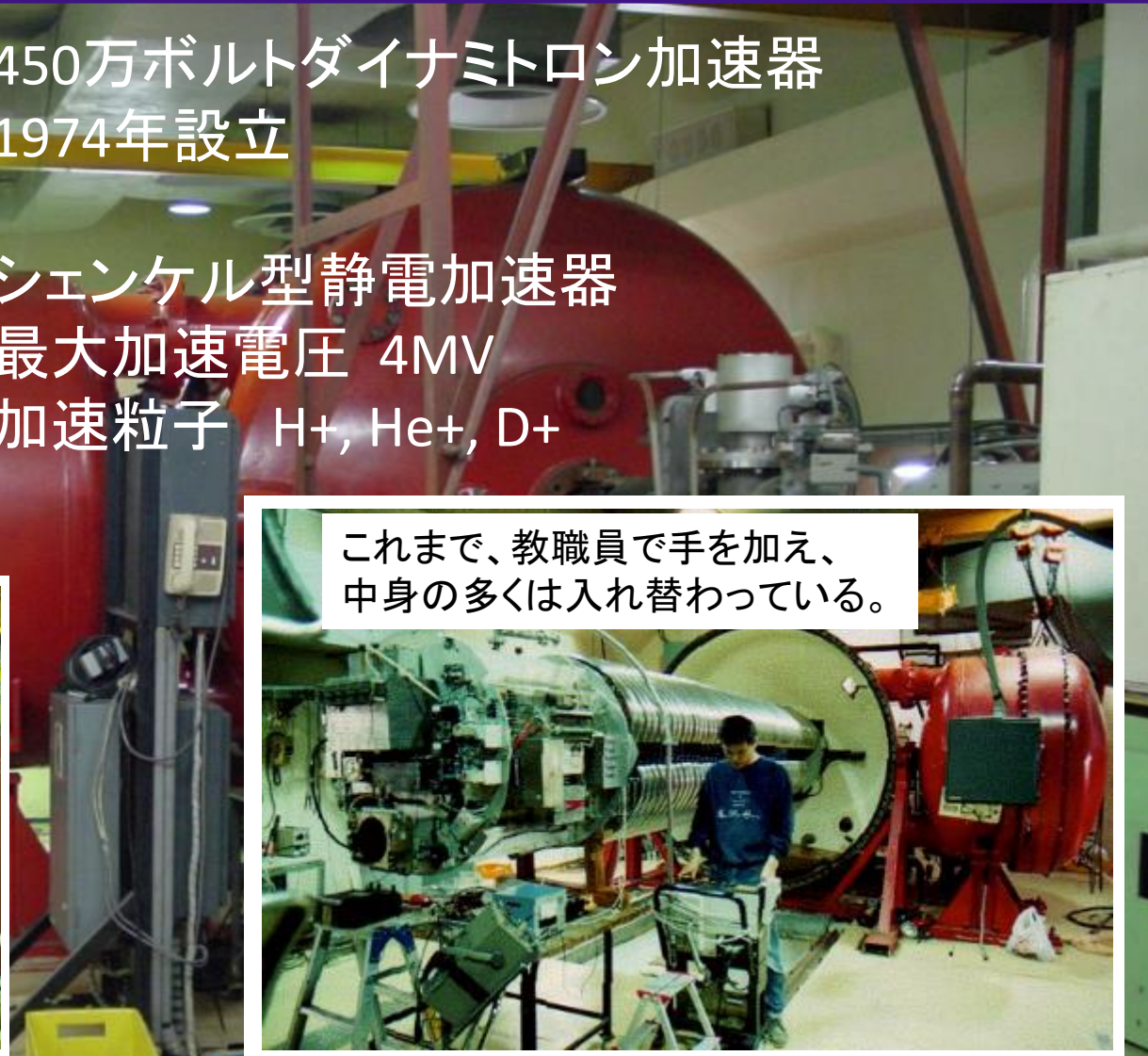


メイン加速器について

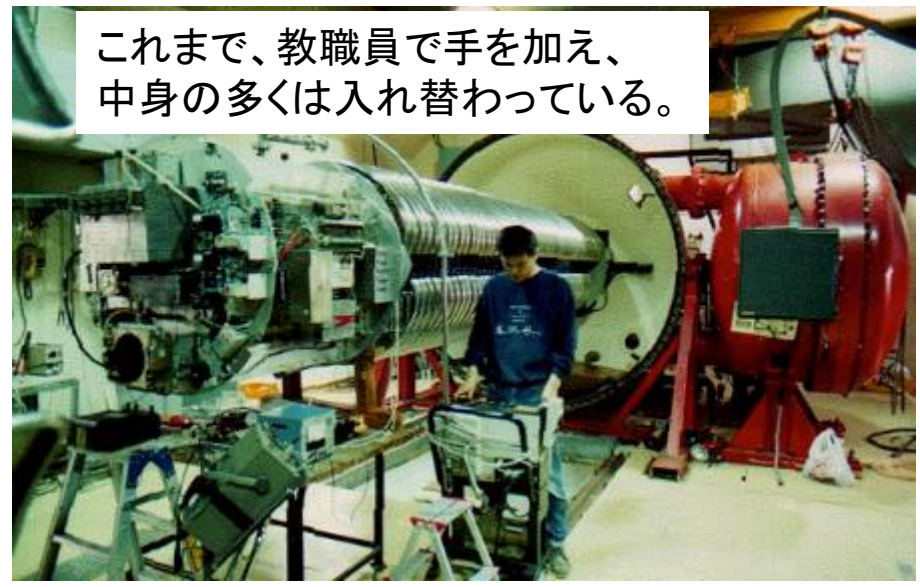
450万ボルトダイナミトロン加速器
1974年設立

シェンケル型静電加速器
最大加速電圧 4MV
加速粒子 H⁺, He⁺, D⁺

もともと米国RDI社製



これまで、教職員で手を加え、
中身の多くは入れ替わっている。



ビームラインについて

•Submilli-Beam Line

•超伝導線材への陽子、ヘリウム照射実験、半導体素子の放射線耐性でテスト

MicroBeam Line

PIXE+RBS+STIM

Micron-CT

PIXE-CT

Neutron Production Line

Li(p,n)反応他

中性子検出器の応答テスト、BNCTテスト実験

MB-II

MB-I

Material Irradiation Line

原子炉材料の放射線耐久テスト実験など。

メイン加速器のメンテナンスや故障修理

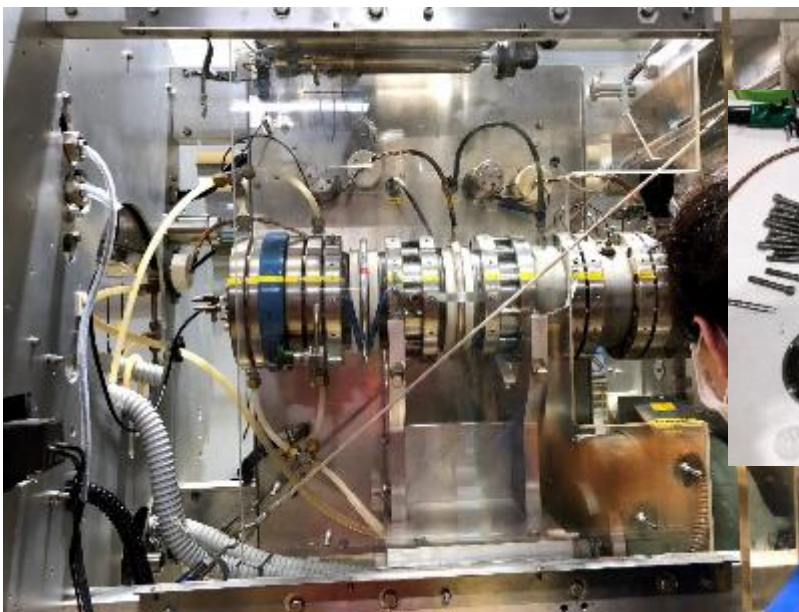
加速器を構成するほぼ全ての要素に関して、職員と教員でメンテナンスする。

高電圧回路

電圧安定化回路のPI制御調整、
発振回路のオシレータの交換、
冷却系のメンテナンス

イオン源

イオン源の解体、クリーニング、組み立て作業など。
1年に1回定期的にメンテナンス。



加速器の維持管理には、専門的な知識と経験を積むことが大切。

仕事内容の拡大

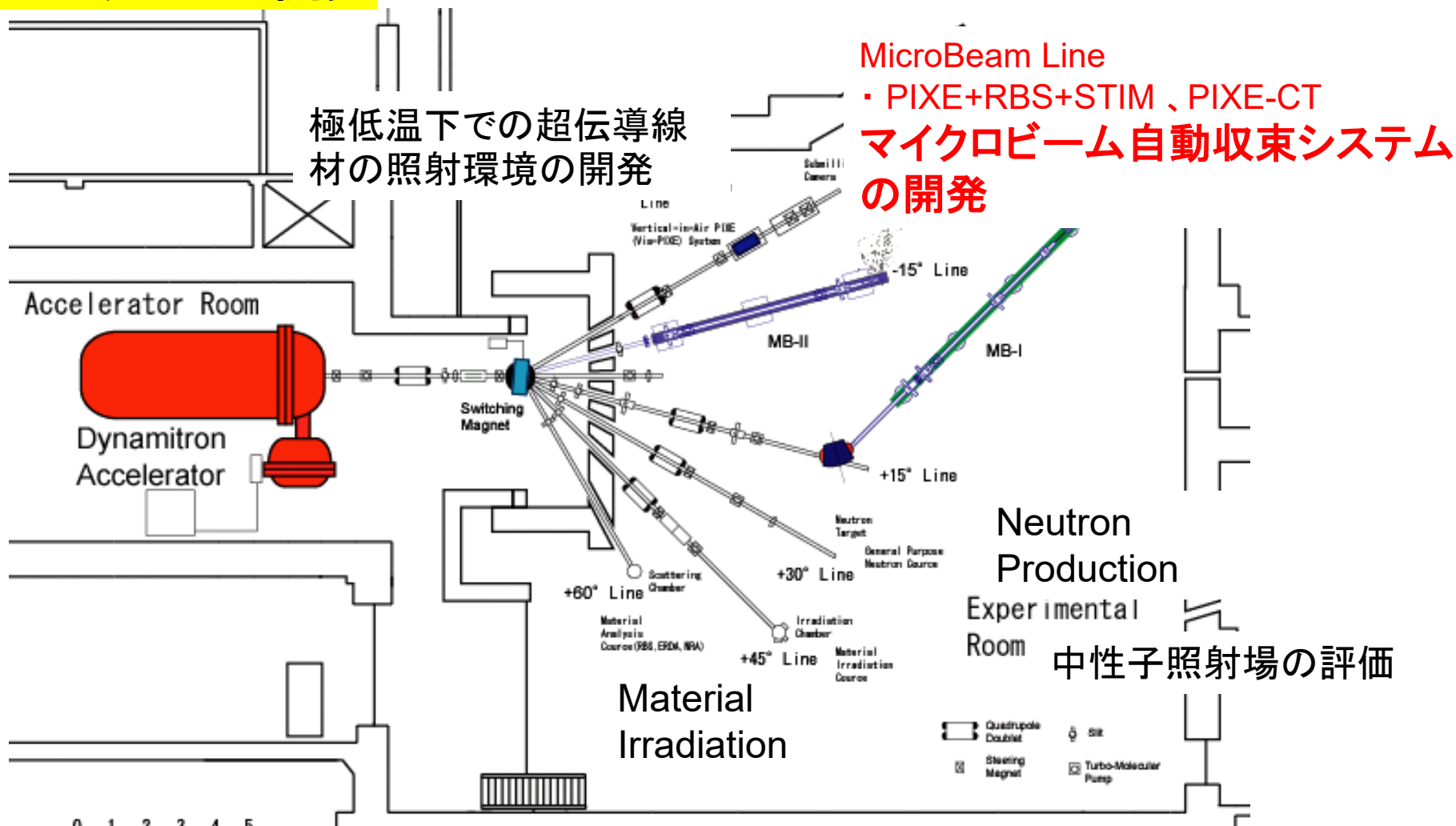
これまで、前任の職員の方々による改造、修理などが繰り返し行われ、近年加速器が非常に安定に動作している。
ノウハウが蓄積され、計画的なメンテナンスが可能になった。

課題申請の増加。
技術職員がビームラインの開発にも積極的に関わる流れ。

技術スタッフが研究者をサポートするには、

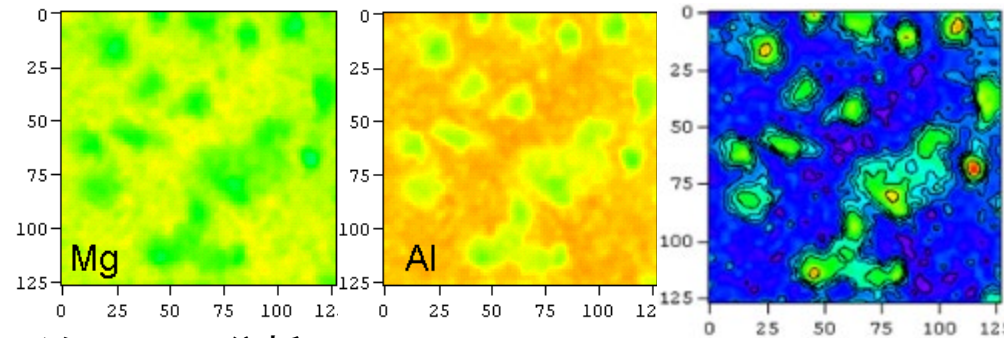
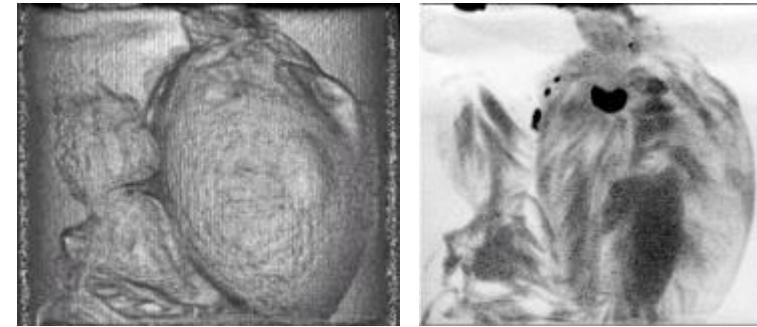
専門的な研究領域にどんどん踏み込んでいくことが要求される。

ビームラインの開発



マイクロビームとは

~1 μ mに絞ったイオンビーム(H⁺, He⁺)
 ターゲット電流100~500pA
 μ m径という非常に小さいサイズを利用した
 マイクロビーム分析への利用が盛ん。



応用例

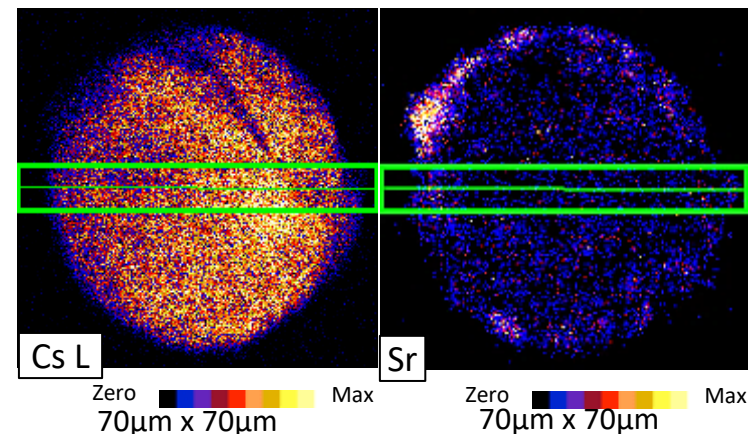
ミクロンCT

マイクロビームを金属片に照射し、
 放出するX線を当てながら、試料を回転させマイクロPIXE分析
 CCD画像をとり、画像の再構成を行う。

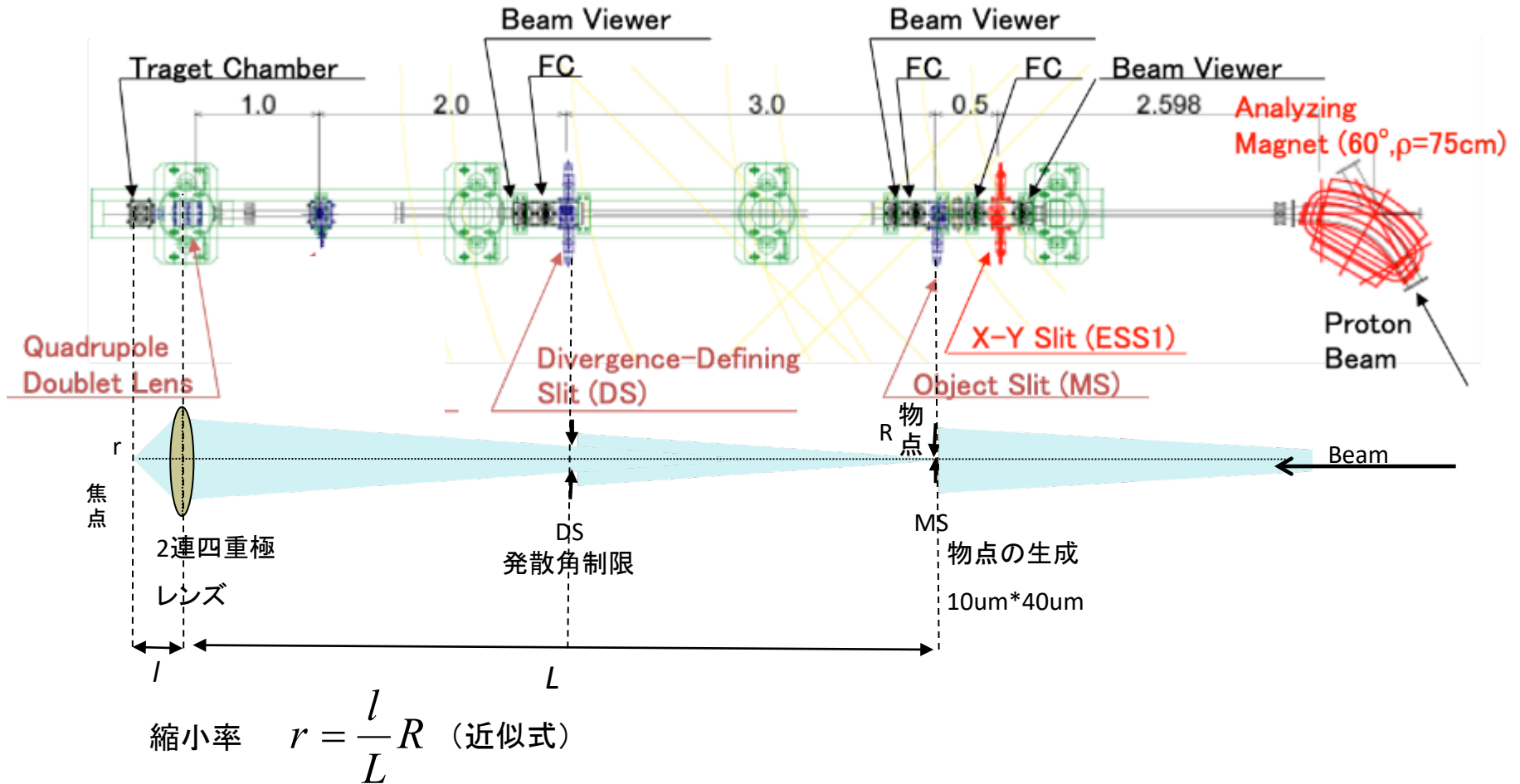
マイクロPIXE分析

マイクロビームを走査しながら照射し、
 試料から放出する特性X線を検出し画像を取得

そのほか、SEM、RBS分析も。



マイクロビーム生成原理



ビームの収束させるには、、、

現実の体系：一点から放射された光でも、経路や運動量の違いなどで一点に集束しない

$$x_i = \sqrt{\underbrace{\langle x|x \rangle x_0^2}_{\text{縮小率}} + \underbrace{\langle x|\theta \rangle \theta_0^2}_{\text{非点収差}} + \underbrace{\langle x|\theta\delta \rangle \theta_0\delta_0^2}_{\text{色収差}} + \underbrace{\langle x|\theta^3 \rangle \theta_0^3}_{\text{球面収差}}^2 + \underbrace{\langle x|\theta\phi^2 \rangle \theta_0\phi_0^2}_{\text{寄生収差}}^2 + \alpha^2}$$

x_0 : x 方向の物点スリットの開口径
 θ_0 : x 方向の発散角
 ϕ_0 : y 方向の発散角
 δ_0 : 電圧安定度

色収差 : ビームの運動量幅と発散角の幅に比例。影響 10^{-9} m程度。

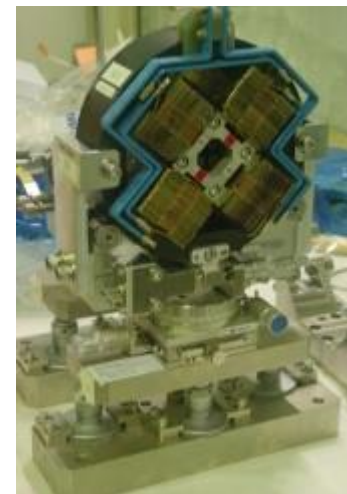
球面収差 : ビームの発散角に依存する。

DSによって発散角を1mrad以下に制限しているため、色収差がビームに影響大。
 → 加速器の電圧安定度の向上、分析電磁石を通すことで運動量を選択し改善

非点収差 : 収束条件があてない場合に発生する収差。収束条件を合わせこめば無くせる。

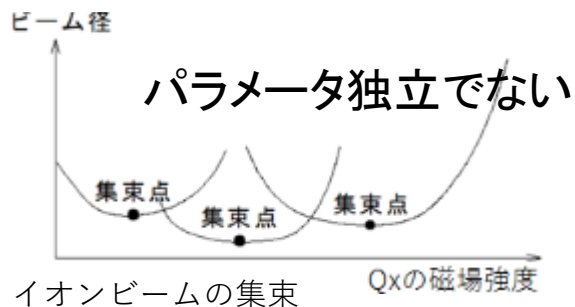
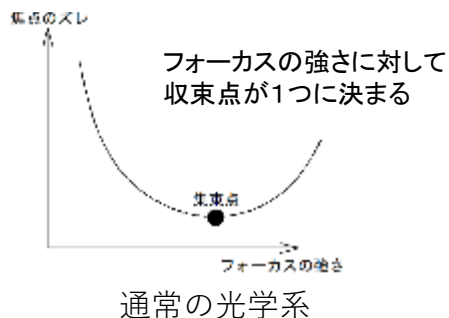
寄生収差 : 四重極電磁石の不整要素 (軸ずれ、回転など)

**非点収差 → Qレンズの磁場強度を精密に調整することで
 ゼロに近づけられる**



既存の方法の課題

① X収束とY収束の独立でない2パラの最適化



② 磁場強度調整が非常に繊細

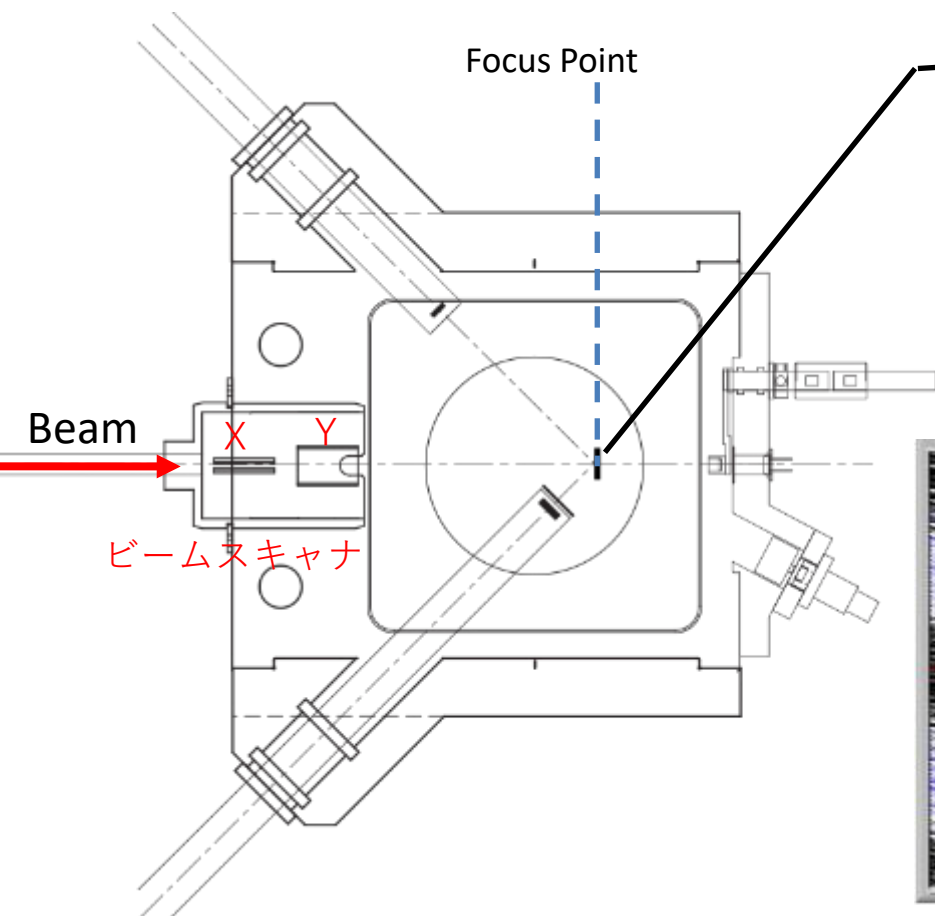
Qレンズは10[A]近くの電流が流れている電磁石
例えば0.15% (5mA) の違いでビーム径は、 $1\mu\text{m}$ から $9\mu\text{m}$ まで変化
磁場強度とコイルの電流値はヒステリシス性を持っている為、正確な再現性が得られない

数時間から半日かかっていた。慣れた人しかビームを収束させられない。
マイクロビーム照射実験の敷居が高くなる。

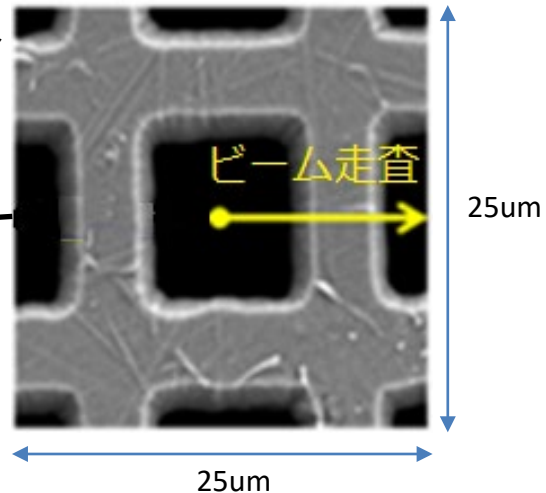
→イオンビーム集束作業の自動化

マイクロビーム生成原理

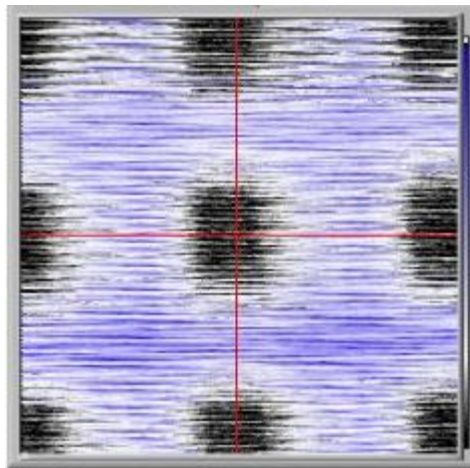
ビーム径の確認の方法



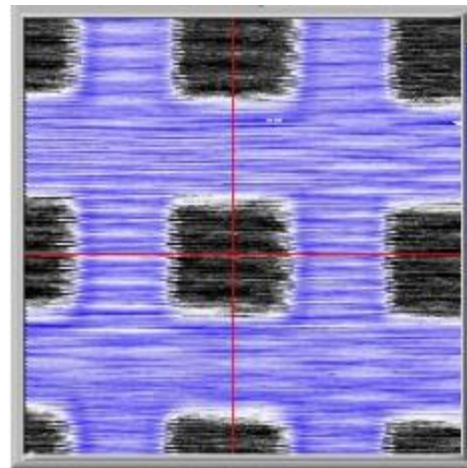
NiメッシュSEM画像
2000line/25.4mm



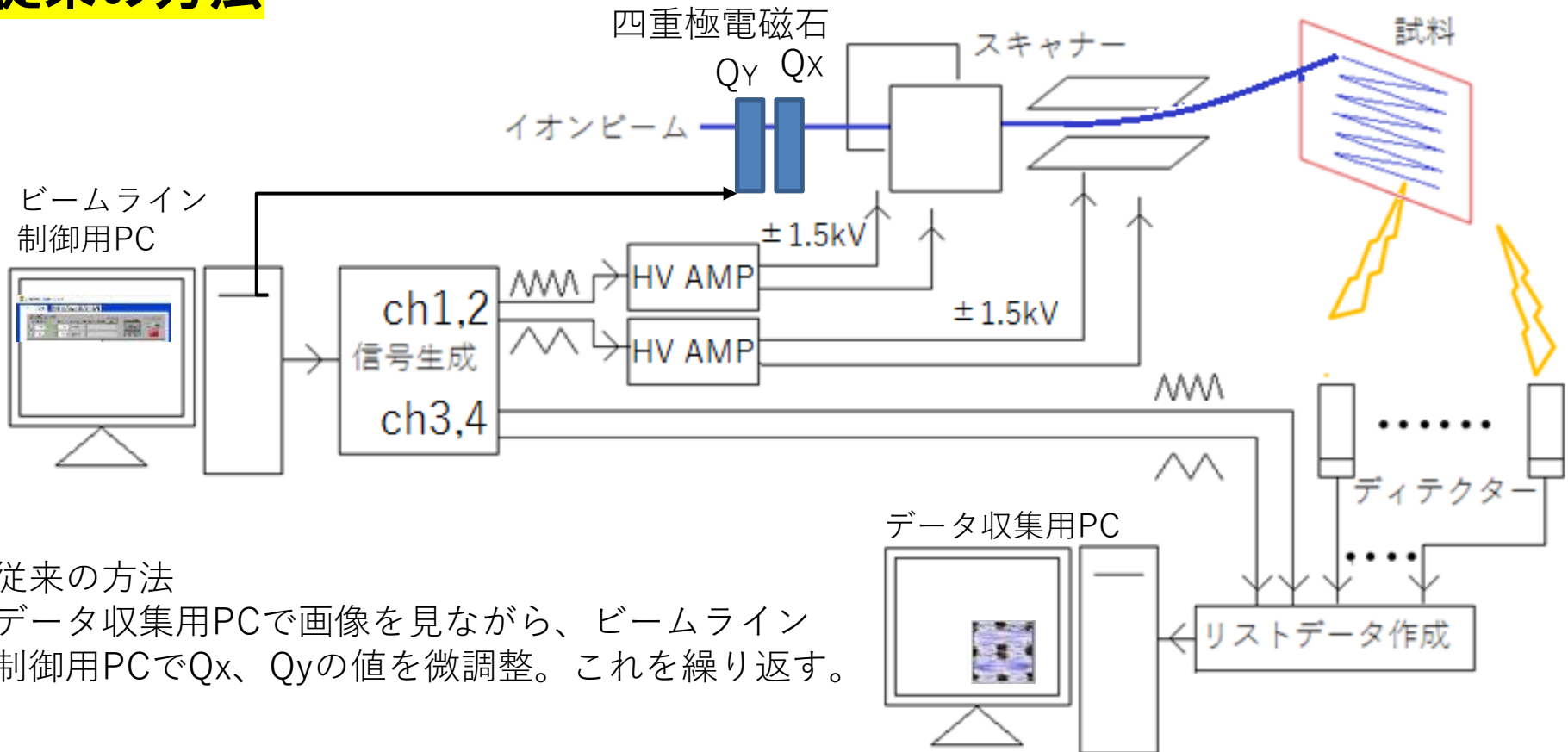
2次電子画像(収束前)



2次電子画像(収束後)



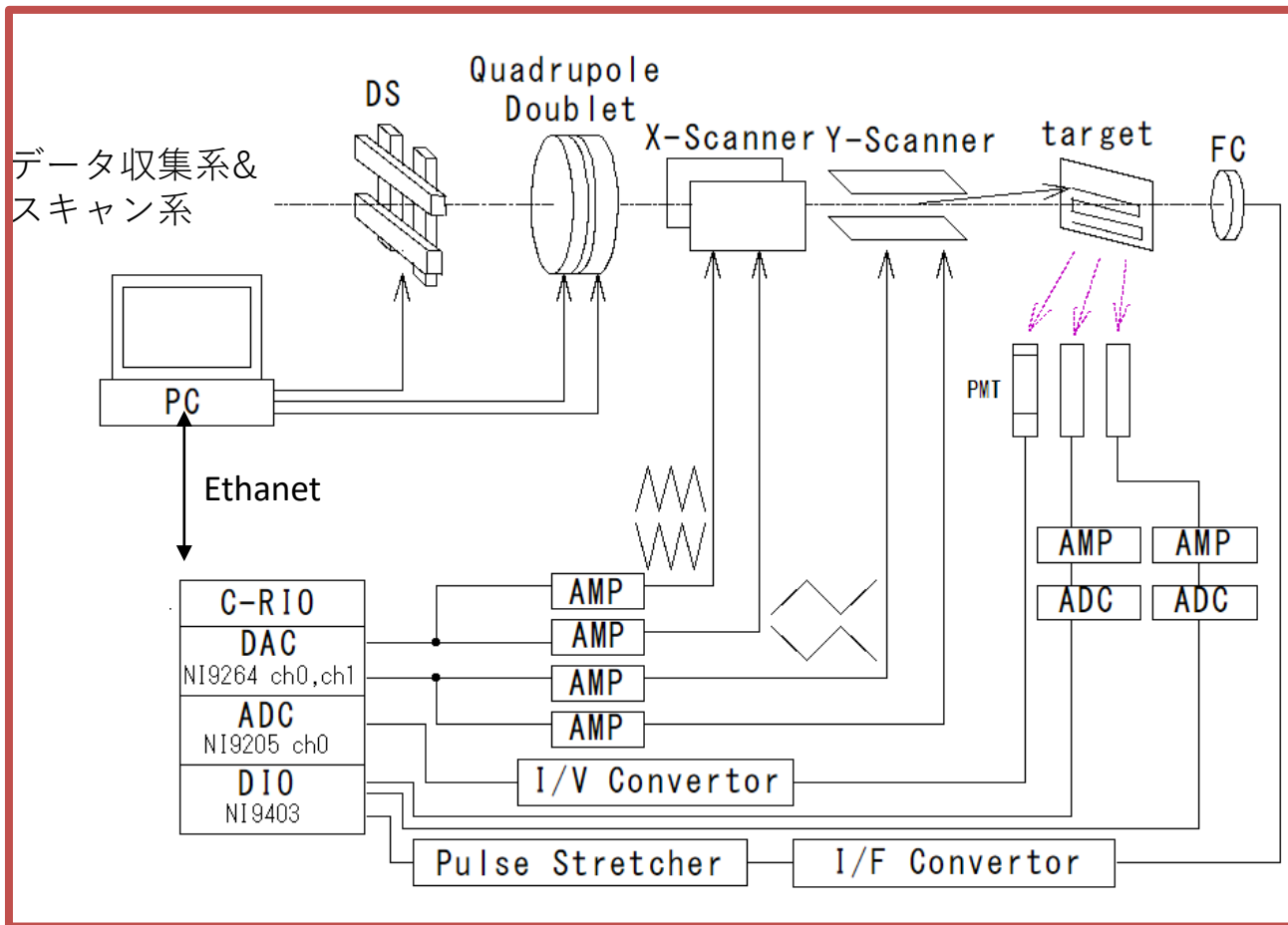
従来の方法



ビームの収束に時間をかけないで済むシステム「ビーム自動収束システム」の開発

新しい自動収束システム

データ収集系とビームライン制御系を統合



- ・ビーム径計算プログラム
- ・ビーム収束プログラム



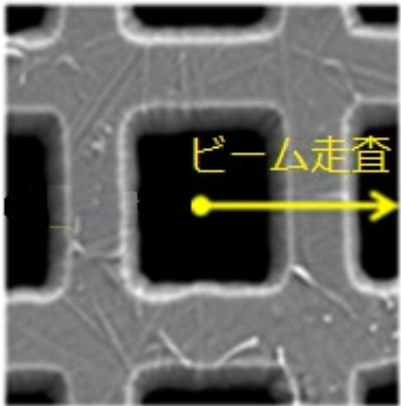
自動収束システム

もともとの
マイクロビームライン制御が
LabView言語ベースで構築。

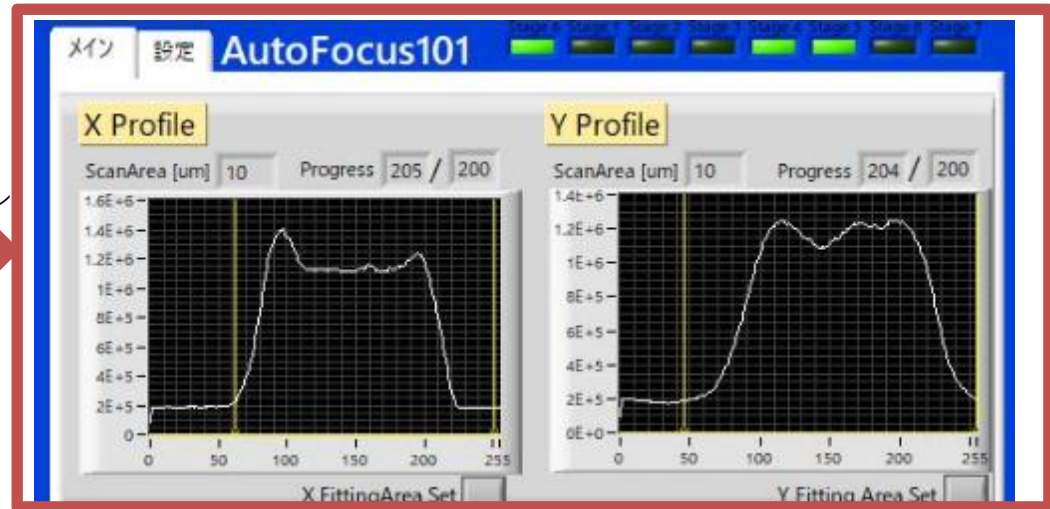
NIのcompactRIOを採用。
LavViewとの相性が良い。

ビーム径計算プログラム

金属メッシュ部分を一方向走査



得られた二次電子
の収量曲線のプロファイル

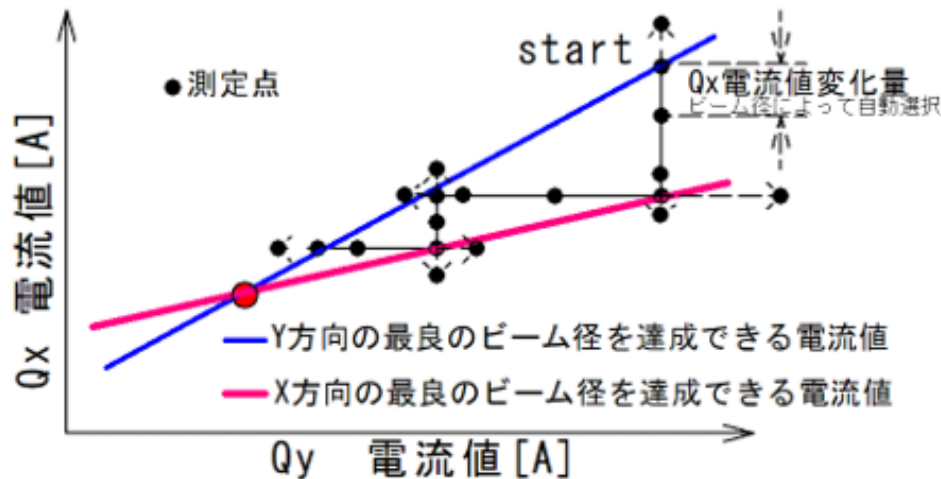


ビームプロファイルのフィッティング
ビーム分布をガウス関数、
メッシュを理想的なステップ関数として、
収量曲線をフィッティングし、
フィッティングパラメータとして
ビームの広がりを得る。

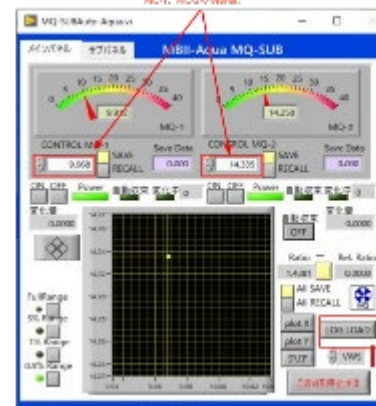


ビーム収束プログラム

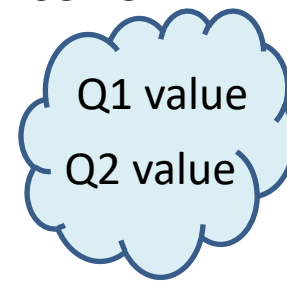
- 0 ビーム径を測定
- 1 Q_y を固定して Q_x を増加させる。
ビーム径を比較し、小さくなる方向に変化させ続ける。悪化するまで続ける。
- 2 変化させる軸を変える。 Q_x を固定し Q_y を変化させる。
- 3 繰り返す。ビーム径が1 μm 以下で変化がなくなるまで。



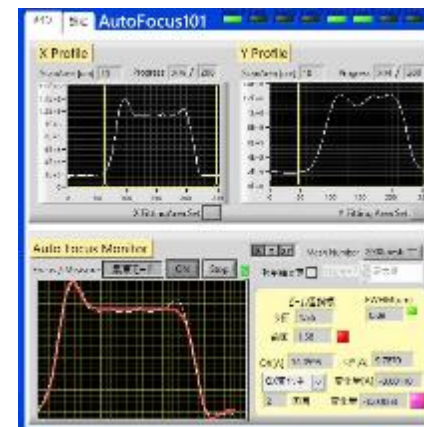
Q_x 、 Q_y 電流のコントロールプログラム



Data Socket
Server



ビーム収束プログラム



ビーム収束プログラムの実用化

ハードウェアの調整

- ・ADCデータ取り込みタイミングとスキャン速度の調整

自動収束プログラム

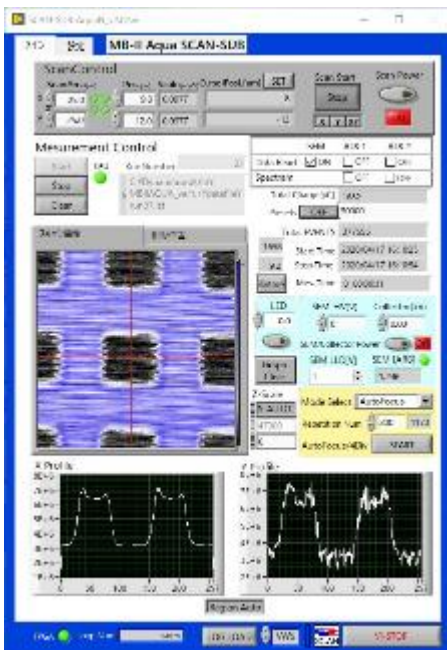
- ・収束判定条件を実ビームで繰り返しテストし、判定条件のブラッシュアップ

約1年半… (もっと)

マイクロビーム自動収束システムの実用化

従来は、この作業に**半日近い時間**を要していたがイオンビーム自動集束システムを使用することで**20分程度**で集束を行える。

マイクロビーム実験に大きく貢献

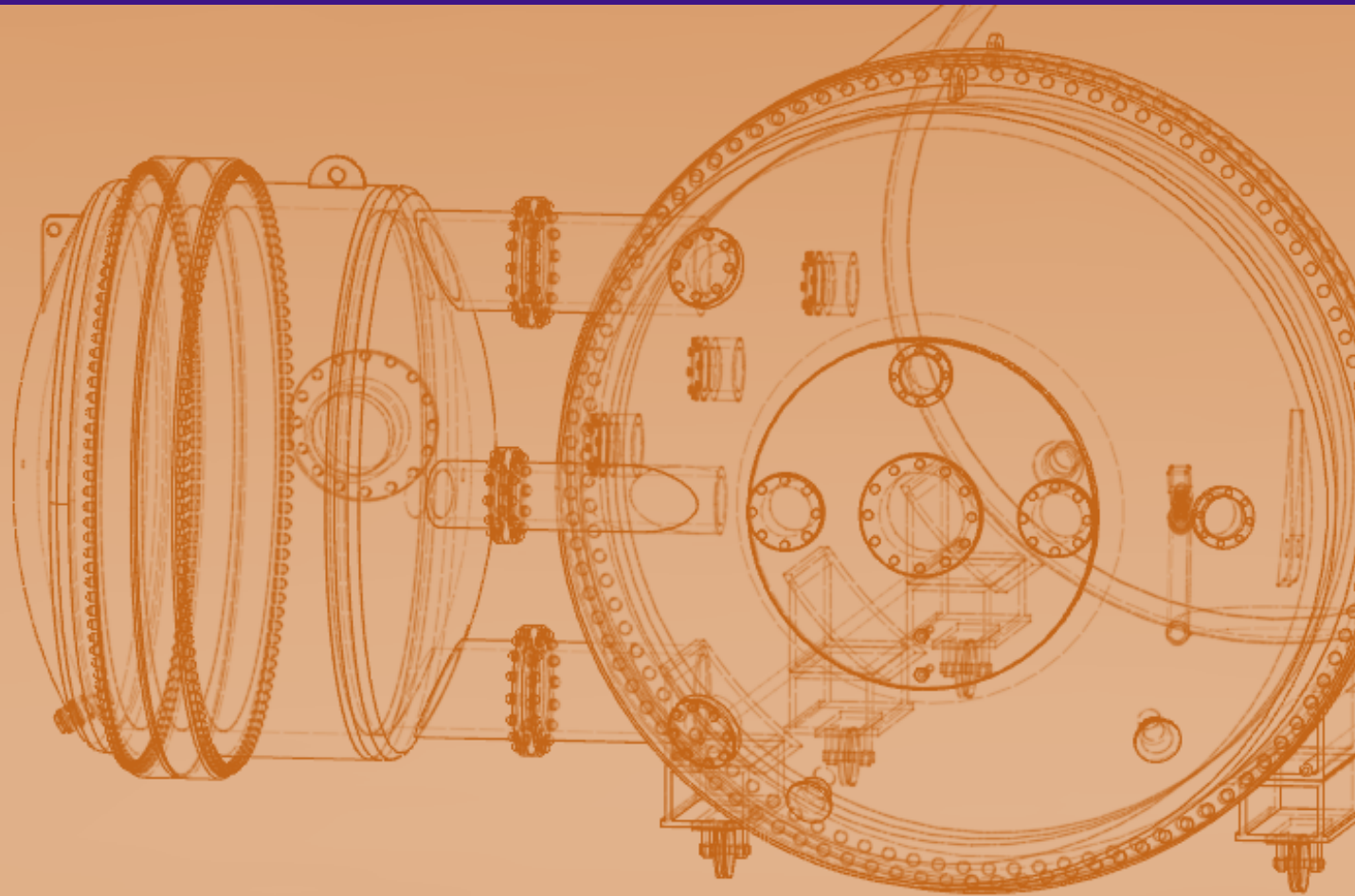


高度技術専門職員の必要性(個人的な意見)

- 日々加速器実験を行う研究者と接する中で、専門的なスキルを有する技術スタッフはとても重宝されると感じている。自分はまだまだ、未熟ですが、、、。
- 研究職とは違う立場から、その研究を支える人間が絶対に必要。しかも、できることなら、学内のチームとして。外注する流れがあるのも事実ですが、、、。

高度技術専門職員をめざすには、、、(個人的な意見)

- **加速器施設は専門的な知識の宝庫。**
電気、機械、真空、物理などの知識、プログラミング(複数言語)、その他を総合的に要求される。得意、不得意はありますが、仕事として出会ったところから自分のものにしていくしかない。
- **熟練の職員の方からの学び**
世代交代の真ただ中。長年の経験を如何に引き継ぐかは大きな課題。
- **研究者、学生との信頼関係**
研究者や学生と日々一緒に実験に立ち会うことで、信頼関係が生まれる。信頼関係もとても大切だと感じる。



ご清聴ありがとうございました