

# ナノテラスにおける APPLE II型アンジュレータ 多極磁場の補正

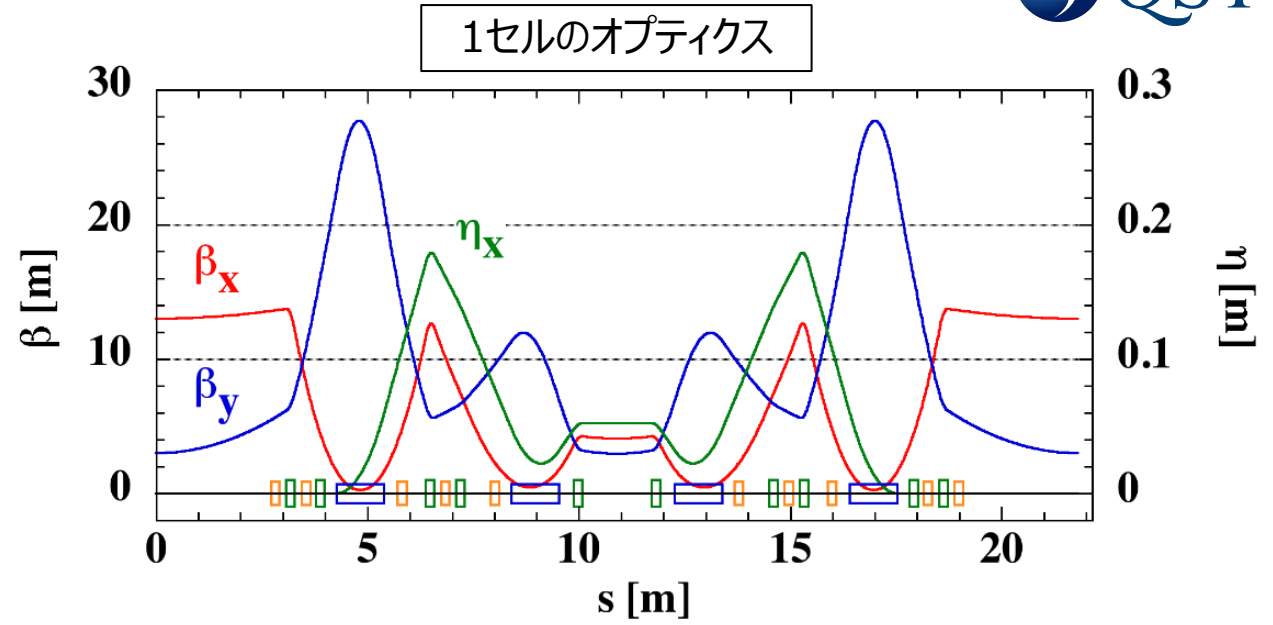
#保坂 勇志,安居院 あかね,稲葉 健斗,上島 考太,小原 脩平,西森 信行(量研),  
齋田 涼太,櫻庭 慶佑(NAT, 量研),  
山本 達(東北大学),福澤 宏宣(光科学イノベーションセンター),  
早乙女 光一(理研, 高輝度光科学研究センター),田中 均(理研)

# アウトライン

1. ナノテラスの加速器とビームライン
2. APPLE II型アンジュレータ
3. マルチワイヤによる補正
4. 補正による効果とその検証
5. まとめ

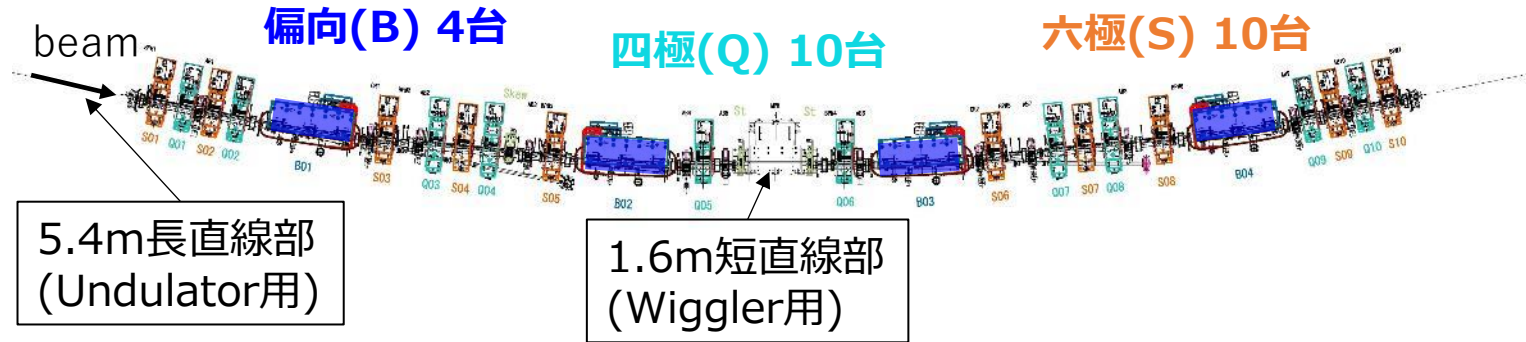
# 1. NanoTerasu

- 3 GeV高輝度放射光施設NanoTerasu
- 2024年4月1日から特定先端大型研究施設として運用開始



加速器のデザインパラメータ

加速器デザインパラメータ	
自然水平エミッタンス	1.14 nm.rad
エネルギー広がり	0.084 %
ベータatronチューン ( $v_x, v_y$ )	(28.17, 9.23)
周長	348.8432 m
モーメントムコンパクション	0.00043
高周波加速周波数	508.759 MHz
ハーモニック数	592



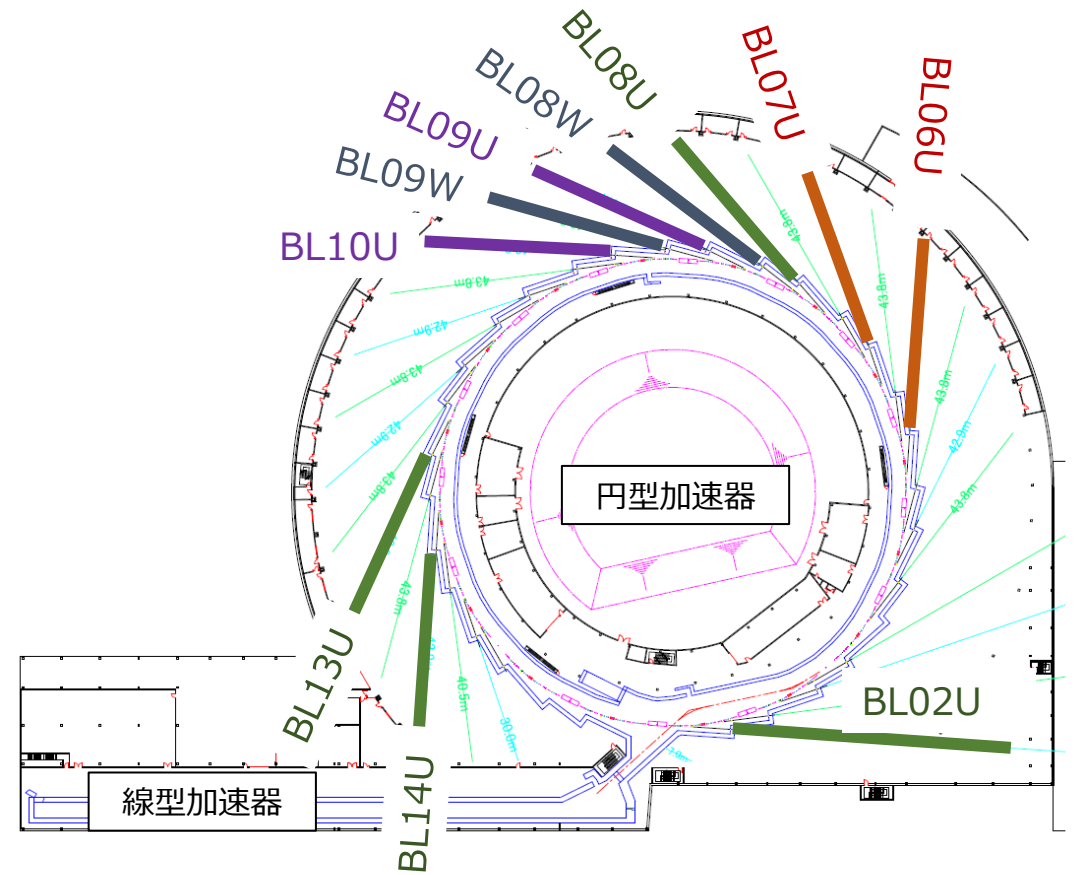
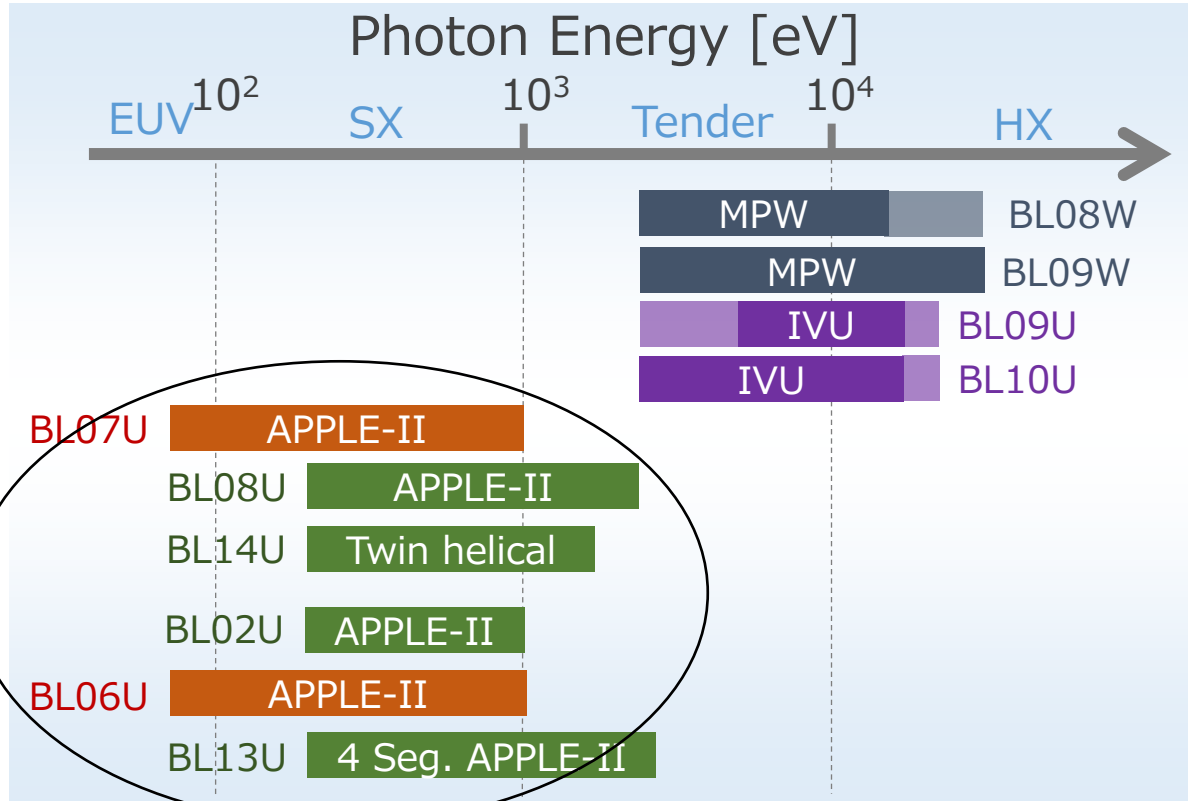
1セルに4つのバンドを用いたアクロマーナラティス設計

# 1. 初期ビームライン10本

NanoTerasuでは偏向電磁石の放射光は使用せず、全て挿入光源を用いる。ビームラインは最大28本。初年度に稼働するビームラインは10本。そのうち5本で偏光切替えが可能なAPPLE-II型アンジュレータを採用。

NanoTerasuのAPPLE-II型アンジュレータ

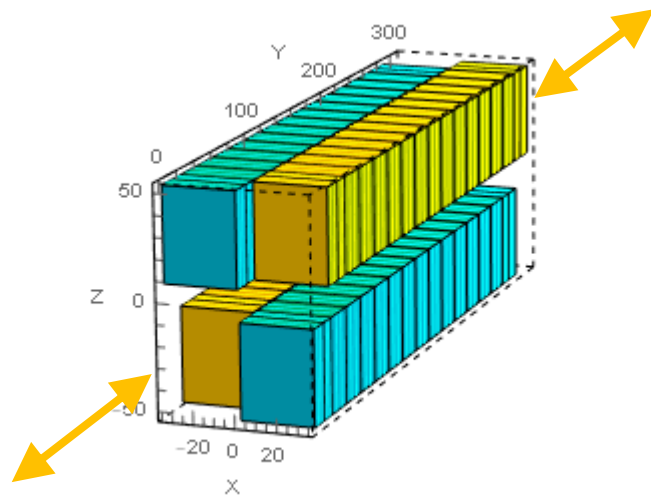
BL	ID type	$\lambda_u$ (mm)	N
02U, 08U	APPLE-II (SX)	56	71
06U, 07U	APPLE-II (EUV)	75	53
13U	4 Seg. APPLE-II (SX)	56	11 x 4



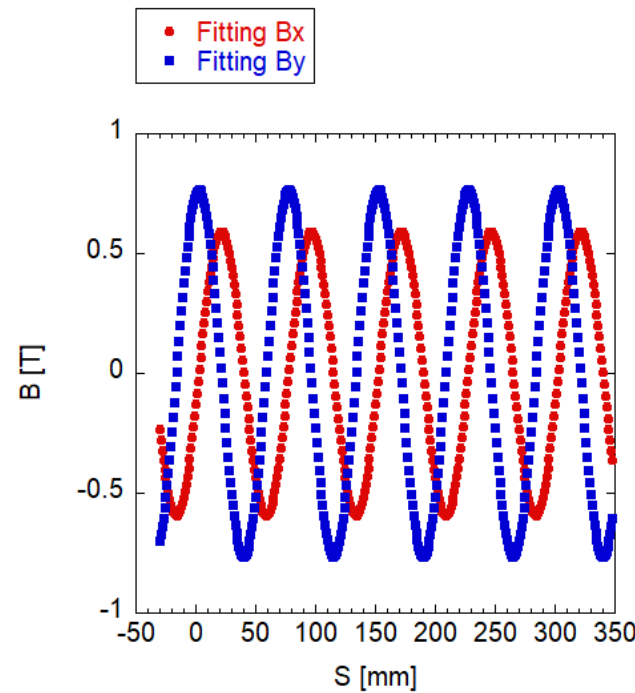
※BL07U, 08U, 08W, 09U, 09W, 10U, 14UはPhoSIC整備  
BL02U, 06U, 13UはQST整備

# 2. APPLE II型アンジュレータ

- 磁石列を上下だけでなく左右にも分割し、ビーム軸方向に駆動できるようにしたアンジュレータ。
- 磁石列のビーム軸方向の駆動により、位相がずれたサインカーブの $B_y, B_x$ を与えることができる。  
⇒位相方向の駆動により、**1台で水平直線偏光・楕円偏光・垂直直線偏光の放射光**が得られる。



斜めの磁石列ペアが  
ビーム軸方向に駆動



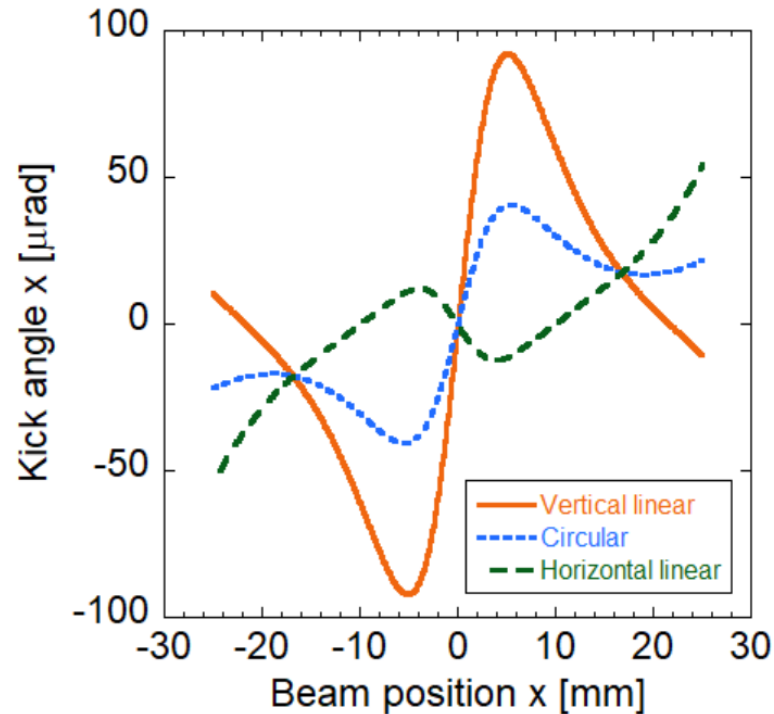
位相を90度ずらしたときの $B_x, B_y$



NanoTerasuのAPPLE II型

## 2. APPLE II型アンジュレータのデメリット

- APPLE II型アンジュレータは多極磁場を発生させ蓄積電子ビームに複雑な悪影響を及ぼす。
- 特にビームの蛇行に由来する成分は水平と垂直で非対称で、一台の電磁石では補正しきれない。
- 影響は蓄積ビームのエネルギーの2乗に反比例し、低エネルギーのリングであるほど悪影響が顕著。

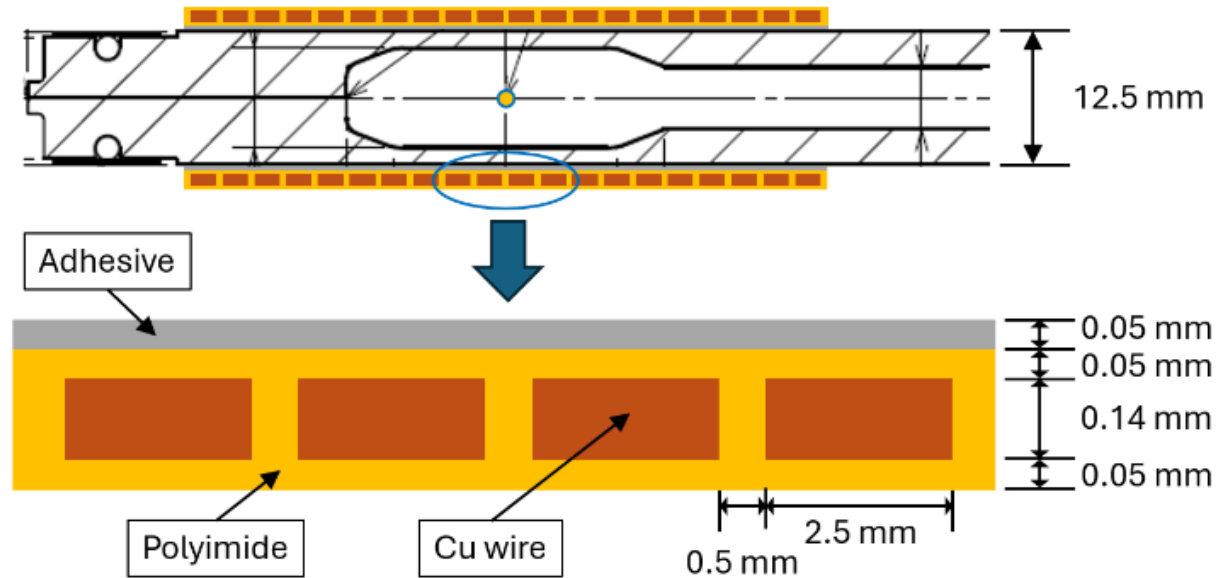
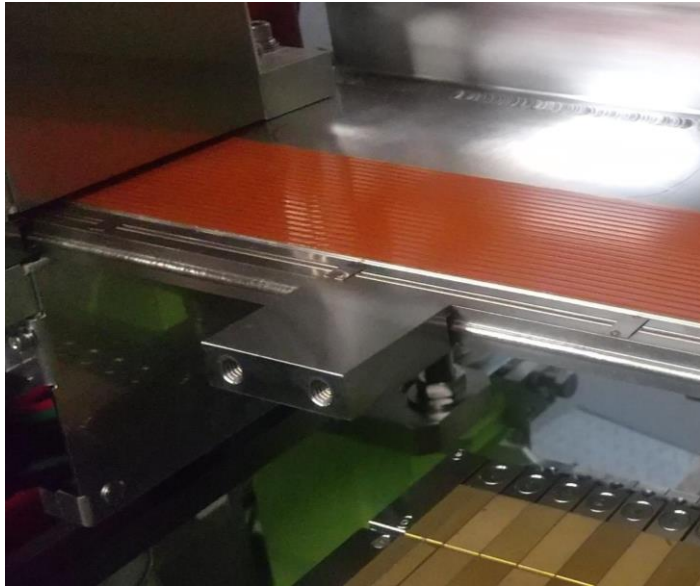


APPLE II型アンジュレータが蓄積ビームに与えるキック角

- 偏光モードによって全く異なる影響を与える。
- 垂直直線偏光で最も影響が大きい。
- 左図の傾きがX方向の4極成分となり、X方向の振幅に依存するチューンの変化を生み出す。  
⇒ ビーム入射効率の変化  
⇒ アパチャー減少によるビーム寿命の変化
- NanoTerasuで予想されるチューン変化は1台あたり最大で0.03-0.04程度。

# 3. マルチワイヤによる補正

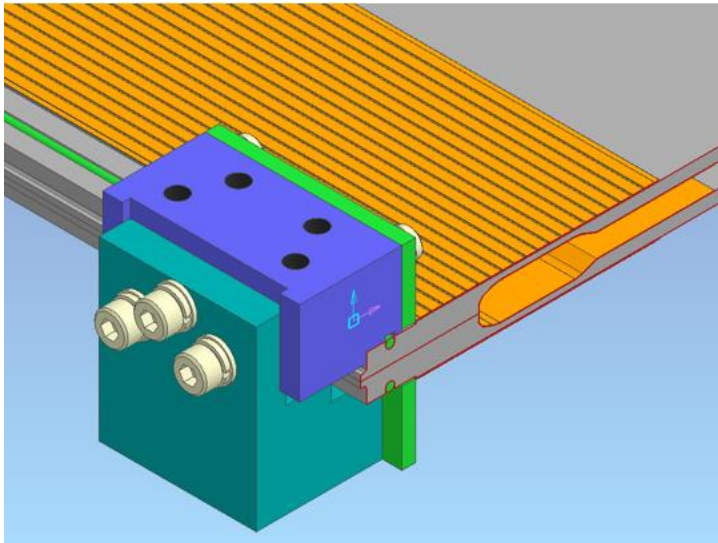
NanoTerasuではチェンバーの上下面にマルチワイヤを貼付し、  
 ビーム軸方向のDC電流による磁場を用いてアンジュレータによる影響を補正する。



- 20本の厚さ0.14 mmのワイヤを3 mmピッチで配置。絶縁層・接着層を含めたトータルの厚みは約0.3 mm。
- 電源台数の制限のため、中央部の10本のワイヤのみに電流を流し、さらに上面下面の同じ位置のワイヤには同じ電流を流す。  
 ⇒ **合計で10 chの電源**から供給
- 中央部10本のワイヤでも補正可能な範囲は±15 mm程度。  
 ⇒ X方向ダイナミックアパチャーと同程度であり十分

### 3. マルチワイヤ設置

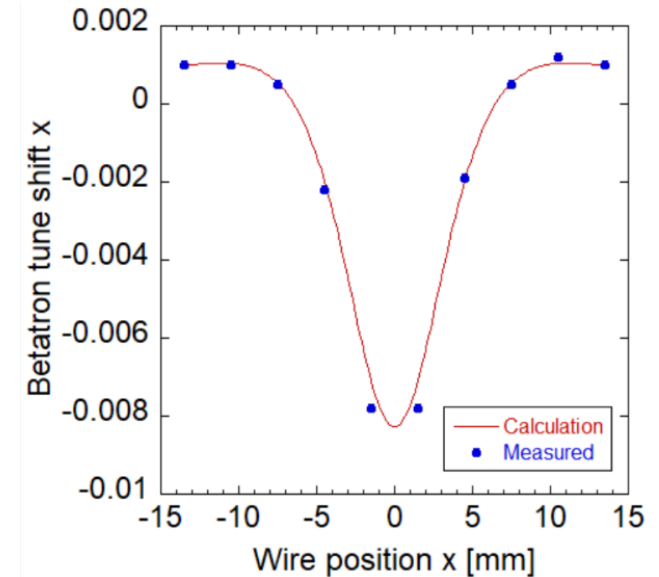
- 5台のAPPLE II型アンジュレータと、ツインヘリカルアンジュレータに2つ、合計7つのマルチワイヤを設置。
- ワイヤがビームに対して傾いて設置されると正しく補正できないため、ピッチ3 mmより十分良い精度の設置が必要。  
⇒マルチワイヤシートの軸とビーム軸を誤差0.1 mm/m 以下にすることを目標に設置。
- 専用の位置決め治具をチェンバーに取り付け、マルチワイヤシートの端面を治具に合うように微調整。
- 微調整は、チェンバーの設置面に界面活性剤を塗布し、粘着層ごと滑らせて行った。  
調整後チャンバーとシートとの間の界面活性剤をへらで追い出し、乾くまで洗濯ばさみでシートを固定。
- 設置後ビーム応答からわかる位置ズレは多くのマルチワイヤで0.1 mm以下。最大で0.4 mm程度のズレがあった。



位置決め治具



界面活性剤の塗布



ワイヤ通電時のチューンの応答



# 3. マルチワイヤ補正計算

アンジュレータによる影響とマルチワイヤによる影響を計算した上で、マルチワイヤ補正電流を決定する。

コンポーネント通過前のビーム座標 $x, y$ と運動量 $p_x, p_y$ から、コンポーネント通過後のビーム座標 $x_f, y_f$ と運動量 $p_{xf}, p_{yf}$ をシンプレクティックにマッピングする手法を用いてアンジュレータとマルチワイヤの影響を計算した。

運動量 $p_{xf}, p_{yf}$ とビーム座標 $x_f, y_f$ は、ベクトルポテンシャルを用いて二次の精度で以下のようにマッピングされる。

$$\hat{p}_{xf} = \frac{\left\{ \begin{array}{l} \left(1 - \frac{\partial f_{011}}{\partial y}\right) \left(\hat{p}_x + \frac{\partial f_{001}}{\partial x} + \frac{\partial f_{002}}{\partial x}\right) \\ + \frac{\partial f_{011}}{\partial x} \left(\hat{p}_y + \frac{\partial f_{001}}{\partial y} + \frac{\partial f_{002}}{\partial y}\right) \end{array} \right\}}{p_n},$$

$$\hat{p}_{yf} = \frac{\left\{ \begin{array}{l} \left(1 - \frac{\partial f_{101}}{\partial x}\right) \left(\hat{p}_y + \frac{\partial f_{001}}{\partial y} + \frac{\partial f_{002}}{\partial y}\right) \\ + \frac{\partial f_{101}}{\partial y} \left(\hat{p}_x + \frac{\partial f_{001}}{\partial x} + \frac{\partial f_{002}}{\partial x}\right) \end{array} \right\}}{p_n},$$

$$x_f = x + z_f \hat{p}_{xf} - f_{101},$$

$$y_f = y + z_f \hat{p}_{yf} - f_{011}$$

ただし、

$$f_{001} = \int_0^{z_f} \hat{A}_z dz,$$

$$f_{101} = \int_0^{z_f} \left( \hat{A}_x - \int_0^z \frac{\partial \hat{A}_z}{\partial x} dz' \right) dz,$$

$$f_{011} = \int_0^{z_f} \left( \hat{A}_y - \int_0^z \frac{\partial \hat{A}_z}{\partial y} dz' \right) dz,$$

$$f_{002} = -\frac{1}{2} \int_0^{z_f} \left\{ \left( \hat{A}_x - \int_0^z \frac{\partial \hat{A}_z}{\partial x} dz' \right)^2 + \left( \hat{A}_y - \int_0^z \frac{\partial \hat{A}_z}{\partial y} dz' \right)^2 \right\} dz$$

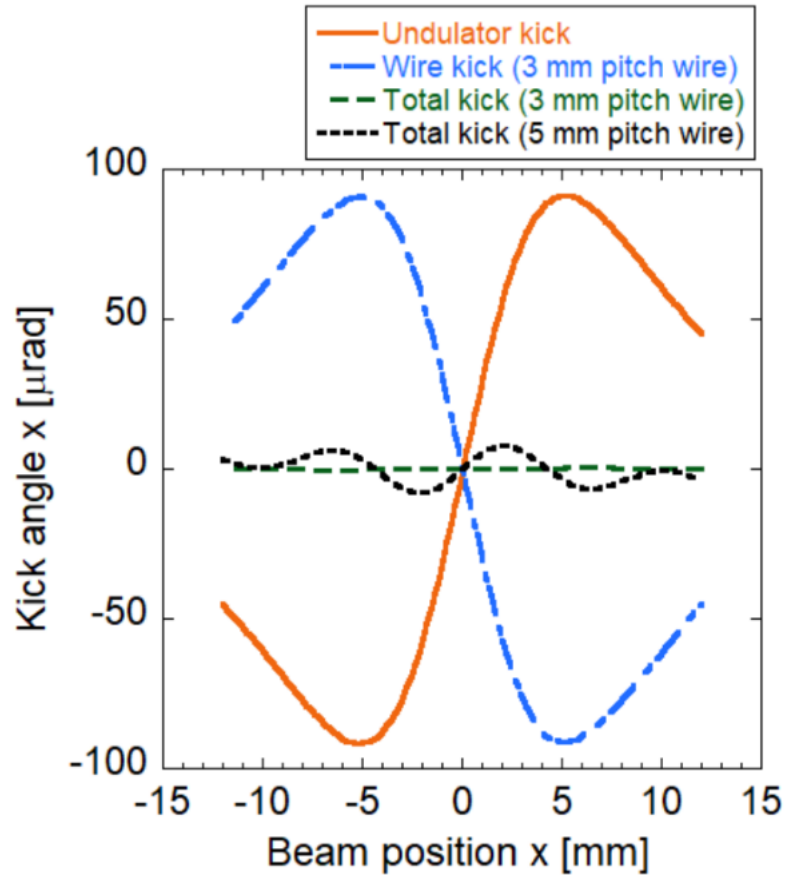
$$p_n \equiv \left(1 - \frac{\partial f_{011}}{\partial y}\right) \left(1 - \frac{\partial f_{101}}{\partial x}\right) - \frac{\partial f_{011}}{\partial x} \frac{\partial f_{101}}{\partial y}$$

アンジュレータ磁石列のベクトルポテンシャルは、Radiaで計算した三次元磁場をHalbach型のモデルでフィッティングし求めた。

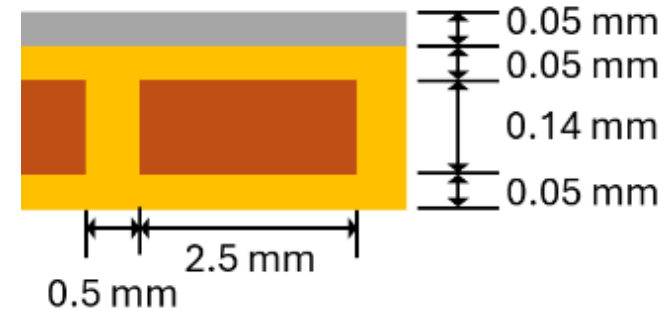
詳細はプロシーディングスを参照...

# 3. 補正計算結果

アンジュレータによるキック角を打ち消すように、10本のマルチワイヤへ流す補正電流を計算により求めた。



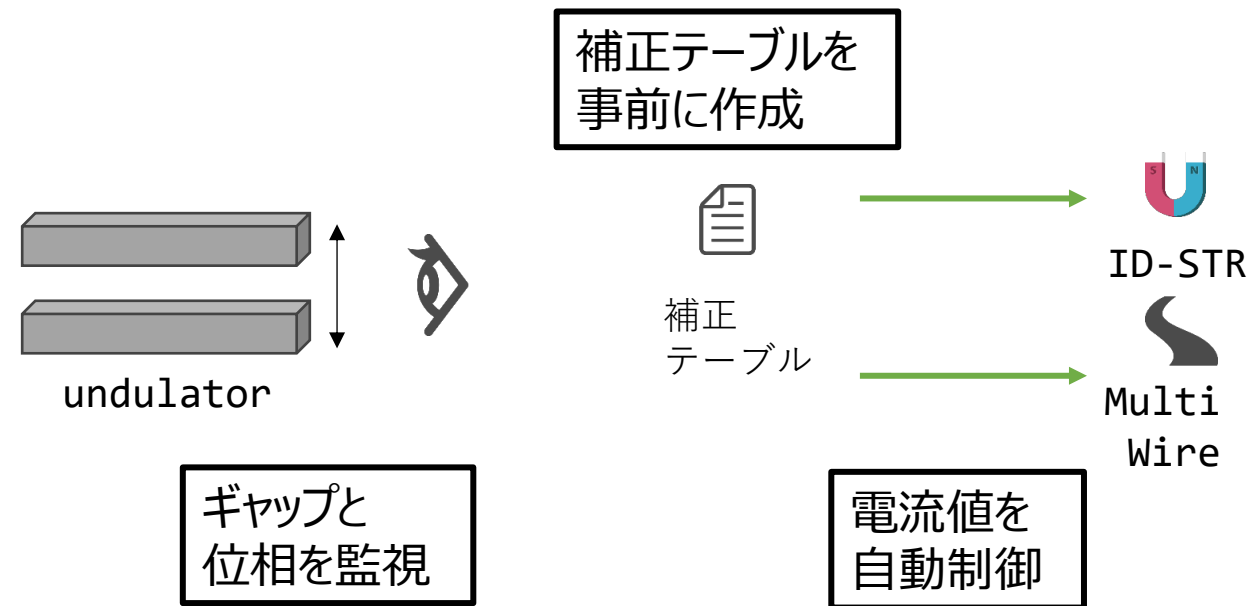
- 3 mmピッチのワイヤの補正計算では  
残留キック角が1/100以下まで抑えられている。  
一方で5 mmピッチでは計算上でも数μradの残差が残る。  
⇒ **NanoTerasuでは3 mmピッチのワイヤを選定。**
- ワイヤが扁平であるため、x方向に5分割して計算を行っている。
- ワイヤ1本あたりの補正電流は、最大で5 A強となった。  
⇒ **±10 AのDC電源10ch**を準備



# 3. 補正スキーム

アンジュレータはユーザーが自由に動かすので、駆動時にマルチワイヤ補正電流を動的に変化させる必要がある。駆動によりビーム軌道も同時に歪むので、ステア電磁石によるビーム軌道補正も同じフレームワークで行う。

1. 各ギャップ・位相での適切なマルチワイヤとステア電磁石の電流を測定により求め、事前にテーブル化する。
2. 現在のギャップ及び位相の状態を常に監視。
3. テーブルを元に補正電流を決定し、自動で変化させる。



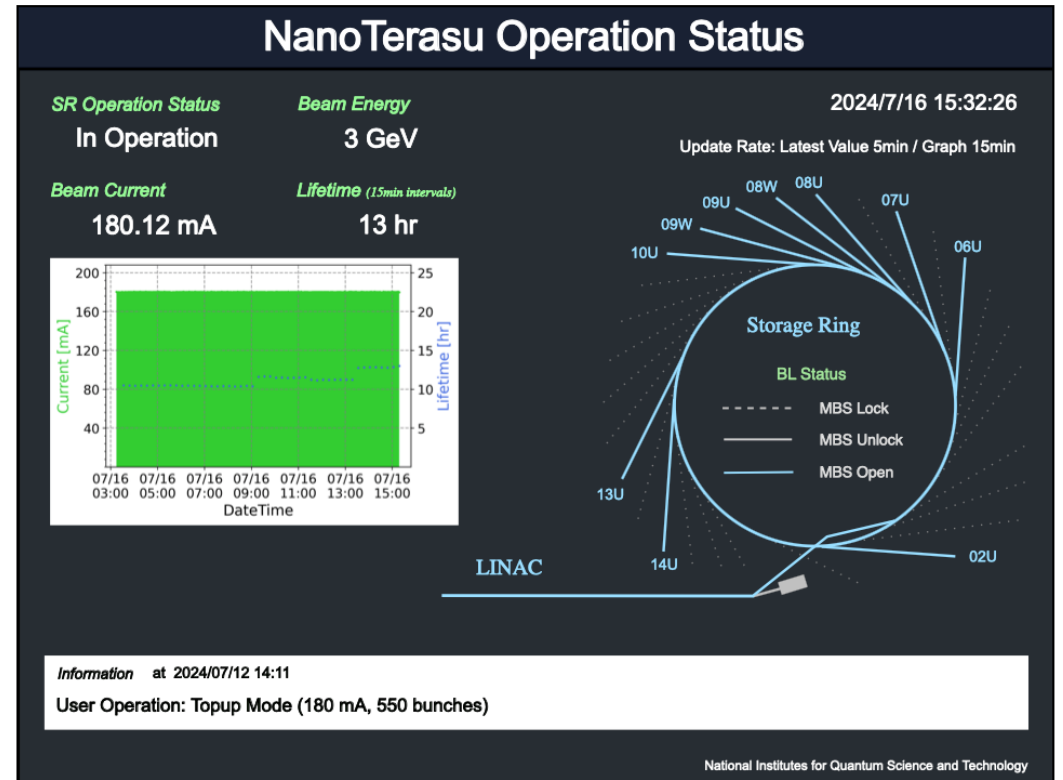
- 補正テーブルの細かさは、線形補間で十分滑らかにつながるようビーム応答を確認しつつ設定。
- 常時監視の周期は0.3 秒間隔。
- アンジュレータの個体差により、マルチワイヤ補正テーブルは計算と実測にズレが生じた。⇒実測×チューンシフトが0になるようワイヤ電流全体をスケール。

# 4. 補正の効果

全てのAPPLE II型アンジュレータを垂直直線偏光モードに設定。  
 全てのアンジュレータを最小ギャップまで閉め、  
 補正の効果を確認を実施。

- y方向チューンに変化がみられたが、定常的な補正の範囲内で元のチューンに自動補正された。
- 入射効率の低下は全く見られなかった。
- 顕著なビーム寿命の減少は確認されなかった。

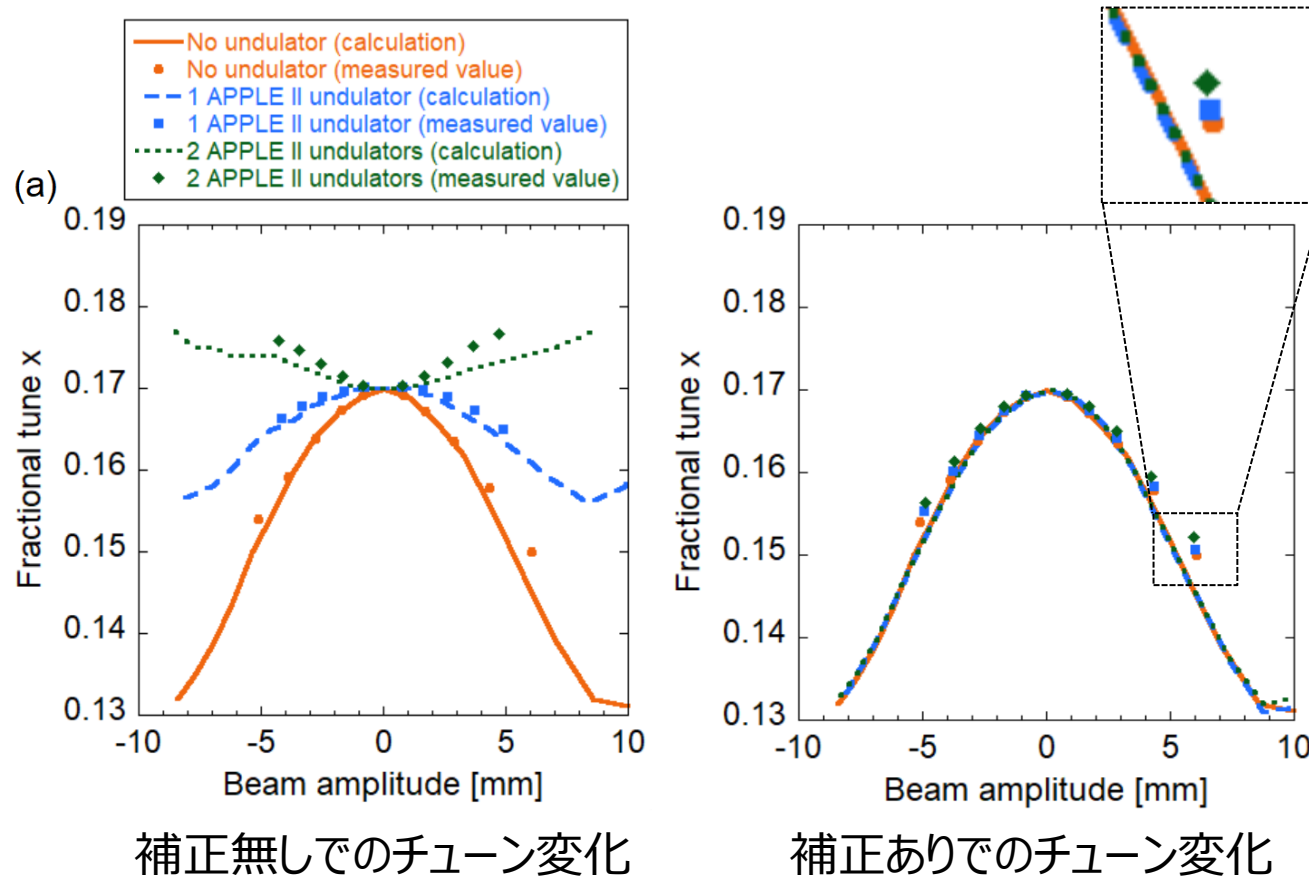
➡ マルチワイヤ補正が健全に動作し  
ユーザーが自由にアンジュレータ駆動できることを確認



ユーザー利用運転時の運転状況  
 ユーザーが自由にアンジュレータ駆動可能

# 4. 振幅依存チューンの測定

通常はビーム入射時に用いているキッカー電磁石を空打ちし意図的に振幅をつくり、振幅依存チューン測定を実施。



- 通常はビーム振幅大ではxチューンは下がる傾向。
- 垂直直線偏光でギャップを閉じると傾向は小さくなり、アンジュレータ2台では**傾向が逆転**。
- アンジュレータ2台ではトラッキング計算で**ダイナミックアパチャーが7割程度まで縮小**していた。  
⇒ビーム寿命減少や入射効率低下につながる。
- 補正有りではアンジュレータ2台を閉じても**大振幅でのチューン減少傾向を維持できている**。
- トラッキング計算と比較すると、実測では振幅依存チューンが少し変化しており、少し補正が不足気味だと分かる。

## 5. まとめ

- NanoTerasuではAPPLE II型アンジュレータによる影響補正にマルチワイヤ補正を採用。
- マルチワイヤは0.1mm/mの精度を目標とし、位置決め治具と界面活性剤を使用し設置。
- 補正テーブルを事前に作成し、監視周期0.3秒でアンジュレータ駆動時に動的に補正を行っている。
- マルチワイヤ補正は健全に動作しており、入射効率低下などの悪影響は見られていない。
  
- 振幅依存チューン測定により、アンジュレータ多極成分が正しく補正されていることが明らかとなった。しかし、計算で得られるよりも少し補正が不足気味である。
- 今後、アンジュレータ増設時などに補正不足により悪影響がみえた場合には、振幅依存チューン測定の結果に基づき既設のアンジュレータの補正を調整することも検討が必要。

【謝辞】 ナノテラス加速器に関わった全ての皆様に感謝致します。