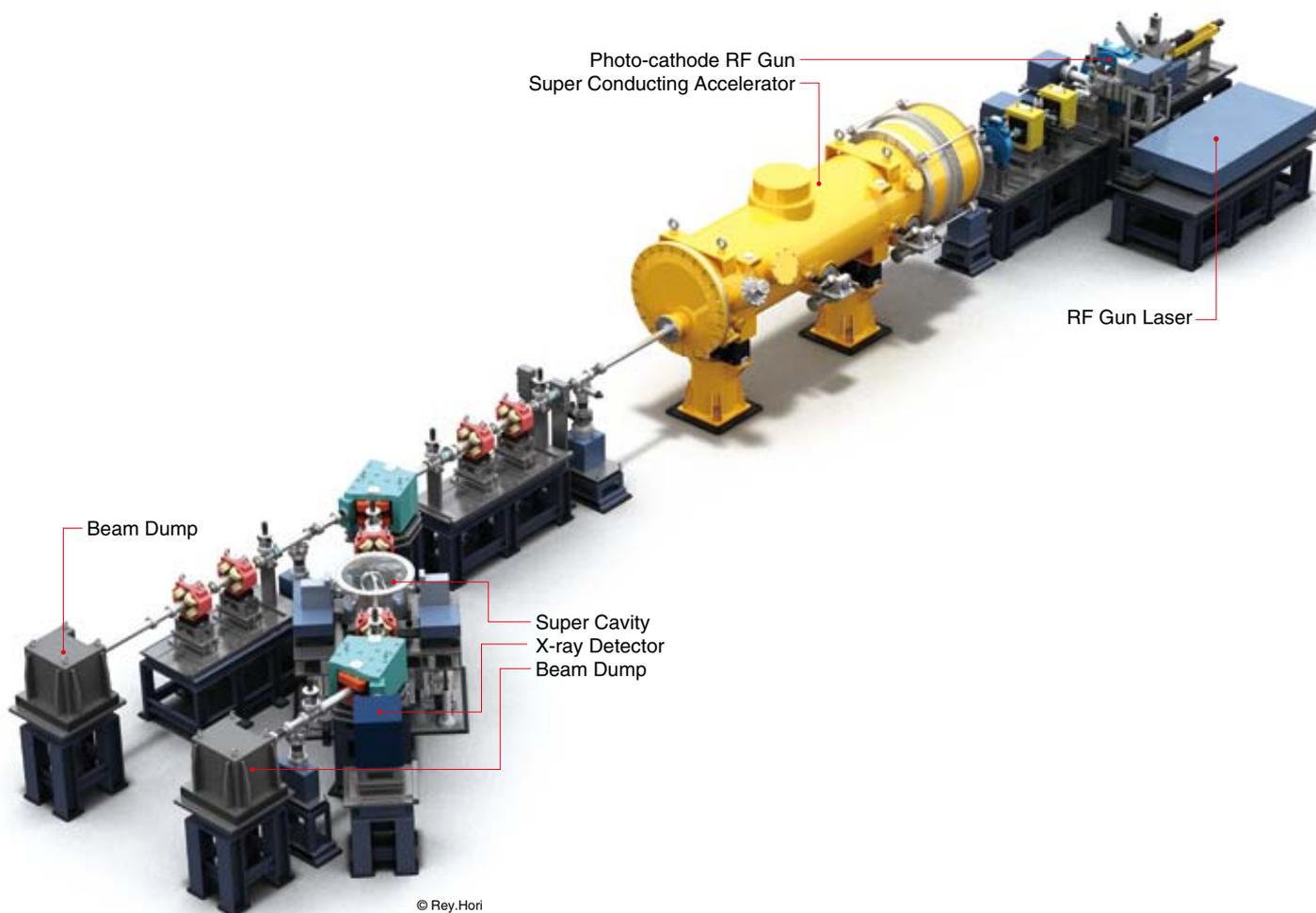


July. 2010

# 高輝度光子ビーム源開発室 ニュース

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

Vol.4



2011年度から STF（超伝導リニアック試験施設）棟に建設する高輝度光子ビーム源実証実験セットアップ。ビーム運転は 2012 年 1 月から開始する予定である。

高輝度光子ビーム源開発室ニュース Vol.4 をお送り致します。ニュース Vol.4 の記事として、米国ワシントン DC の Rockville で行われた DOE（Department of Energy）主催の Compact Light Sources Workshop 報告と 9-cell Super Conducting Cavity 開発報告をそれぞれ早稲田大学、坂上和之氏と高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設、早野仁司氏にお願いしました。ニュース Vol.5 は開発レーザー装置の実用化と本光子ビーム源を使った応用実験に関する報告を行う予定です。ご期待下さい。

## ■ Compact Light Sources Workshop 報告

### 坂上和之

早稲田大学 理工学術院 理工学研究所

2010年5月11日(火)、12日(水)の2日間にわたり、米国ワシントンDCのRockvilleでDOE (Department of Energy) 主催の Compact Light Sources Workshop が開催された。本ワークショップでは小型光源技術に関して5つの発生方法の異なる光源技術、すなわち “Laser HHG (Higher Harmonic Generation)”, “Plasma Sources”, “Plasma Accelerators”, “Small Synchrotrons” と本量子ビームプロジェクトがベースとしている “Inverse Compton Sources (ICS)” の研究者が集まり、それぞれの光源の進捗と近い将来の達成される光輝度に関して議論した。参加者は約60人で、半数以上が米国の研究者、日本からの参加者は筆者と本プロジェクト代表者の浦川教授のみであった。このことから本プロジェクトが世界的にも注目されていることを感じた。

初日は8時15分から始まり、まずDOEのPedro Montano氏より本ワークショップの趣旨の説明があった。続いて、現在広く利用されているシンクロトロン放射光、自由電子レーザーのパフォーマンスに関する講演がANL (Argonne

National Laboratory) のMichael Borland氏により行われた。小型光源の比較対象となる現在の光源のパフォーマンスが平均輝度(ALS)・ピーク輝度(LCLS)両面から示された。報告は主に[1]を基にして行われたので、参考にされたい。その後、それぞれの光源技術に関する全体講演が行われた。極短パルスのレーザーをガスに照射することによって高次の高調波を生成するLaser HHGについてはColorado大学のMargaret Murnane氏が、固相密度の物質と極短パルスレーザーの相互作用によるPlasma SourcesについてはColorado State大学のJorge Rocca氏が、プラズマによって加速される電子を用いる光源としてのPlasma AcceleratorsについてはSLAC (Stanford Linear Accelerator Center) のMark Hogan氏が、強磁場の電磁石を用いて実現されるSmall SynchrotronsについてはMIT (Massachusetts Institute of Technology) のWilliam Barletta氏が、レーザーと電子ビームの衝突によって高エネルギーの光を生成するInverse Compton SourcesについてはMITのDavid Moncton氏がそれぞれの原理から最新のアイデアまでを含めておこなわれた報告し



写真1: ワークショップの案内板



写真2: 全体会議の様子

た。

昼食後、それぞれの光源技術に分かれて最新の成果や計画に関する議論が行われた。筆者はICSのセッションに参加し、量子ビームプログラムにおける現在までに行われたX線生成試験結果に関して報告し、浦川教授は最終的に予定されている装置概要や光源性能を報告した。本ワークショップには世界の名立たるICS装置及び計画に参画する研究者が参加しており、それぞれの報告が行われた。まずはLBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) のEric Esary氏によってICS光源の特徴に関して計算結果を交えた講演が行われた。本セッション参加者はICSの専門家ばかりであるが、ICSの特徴に関して共通認識を持つために行われた。Esary氏の講演していなかった特徴に関して講演後の議論において指摘され、その後のセッションのまとめを作成するための共通認識とした。

多数の講演があったため、ここでは講演順ではなく『進行中』と『計画段階』に分けて報告させていただくことにする。『進行中』のICS光源として現在世界で最も高い平均輝度を実現している装置としてLyncean Technologies Inc.(LTI)の小型シンクロトロンと光共振器を組み合わせたICS光源に関してRonald Ruth氏により講演された。図1はその装置図を示している。目標としている平均強度は $10^{11}$ ph/s/0.1%bw、平均輝度は $10^{12}$ ph/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bwであり、現状はそれぞれ1桁小さいという報告であった。現在この1桁のギャップを制限しているのは光共振器のミラー破壊閾値であり、これについて開発を進めていることが述べられた。本量子ビームプロジェクトも光共振器を用いており、ミラー破壊が観察されていることから有意義な議論をすることができるとともに今後も情報交換を継続することとなった。また、この講演ではX線イメージ(図2参照)やグ

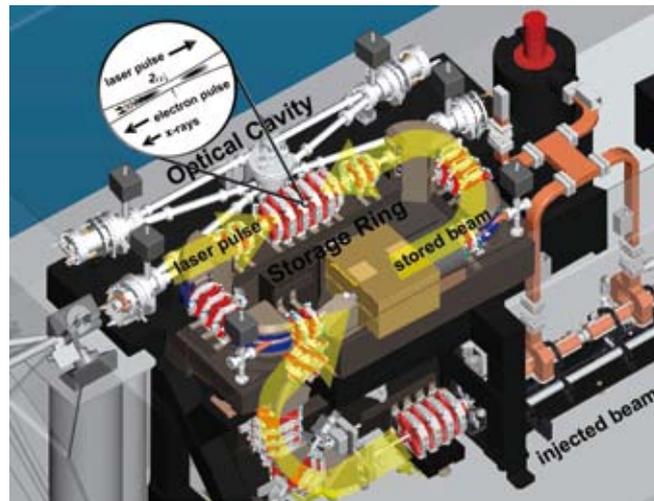


図1：LTIの小型光源装置

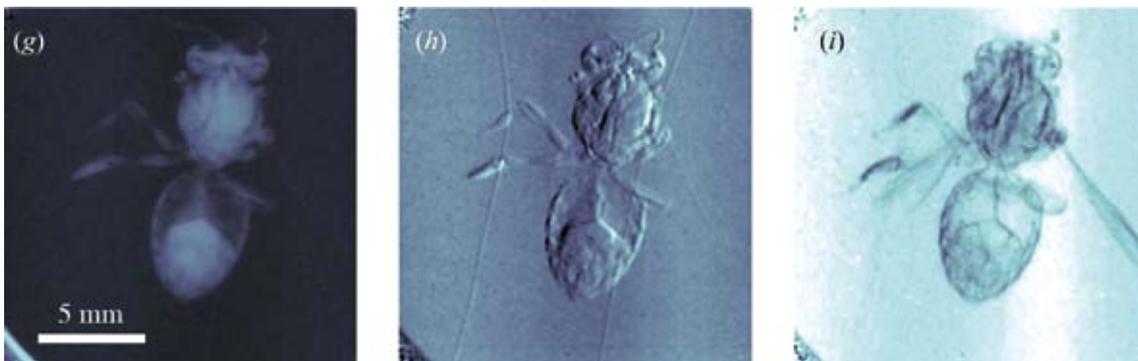


図2：LTIの小型光源で撮影された蜂のX線像 [2] 左から吸収像、位相コントラスト像、暗視野像

リシンの構造解析に関するデータも示され、最も注目度の高い講演であった。CEA (French Atomic Energy and Alternative Energies Commission) の Anne-Sophie Chauchat 氏からはヨーロッパで計画されている小型光源 THOMX プロジェクト [3] に関する報告があった。CEA では 17MeV の電子ビームと 532nm のレーザー光の衝突によって 10.3keV の X 線を実現している。現在は実証実験段階であるが、これをベースとして THOMX と呼ばれる小型シンクロトロンと光共振器による小型光源計画が進行中であり、2014 年頃に実機が完成する予定とのことである。THOMX プロジェクトには我々の協力研究者であるフランスの LAL (Laboratoire de l' Accelerateur Lineaire) の研究者が光共振器開発として参加しており、今後の進捗が期待される。『進行中』のプロジェクトとしてはこれに加え我々の量子ビームプロジェクトがあった。本プロジェクトの概要に関しては [4][5] を参照いただきたい。

『計画段階』の講演としては、MIT における超伝導線形加速器と光共振器を用いた小型光源計画が William Graves 氏より示された (図 4 参照)。超伝導 RF 電子銃と超伝導線形加速器を用いることで連続運転が可能であり、高平均輝度が期待できる。また、ナノバンチ化された電子ビーム

を用いることによるコヒーレント ICS の可能性についても議論され、高ピーク輝度の光源も併用できるように計画しているとのことだった。MIT のみならず世界中でコヒーレント ICS に関する議論がなされており、将来へ向けたアイデアとして期待されている。Jefferson Laboratory の George Neil 氏からは FEL 発振器内における ICS 光源に関する報告があった。計画は CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) や ERL (Energy Recovery Linac) 内に設置した FEL 発振器内にてコンプトン散乱を実現することで最大で MeV オーダーの高エネルギー光子ビームを生成する予定とのことであった。すでに本手法を実現している Duke 大との比較も報告された。

ワークショップは夕食後も引き続き行われ、12 日午前までかけて ICS セッションのまとめを作成した。その際に作成されたそれぞれの装置の予定する光輝度のまとめが以下の表 1 (平均輝度) と表 2 (ピーク輝度) である。平均光輝度に関しては我々の量子ビームプロジェクトが世界一の性能を予定していることが分かる。このまとめによって世界の多くの ICS 研究者に認識させることができたと確信している。表 2 に示す通り、ピーク光輝度についてもコヒーレント ICS のアイデアによって  $10^{20}$  を超えるピーク輝度が現実味を帯び

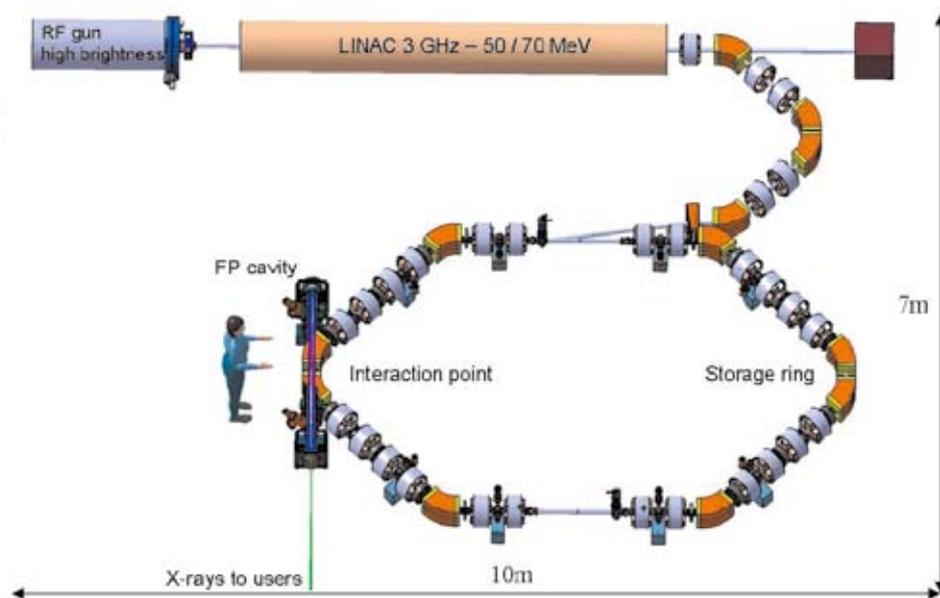


図 3 : THOMX プロジェクトの小型光源装置計画図

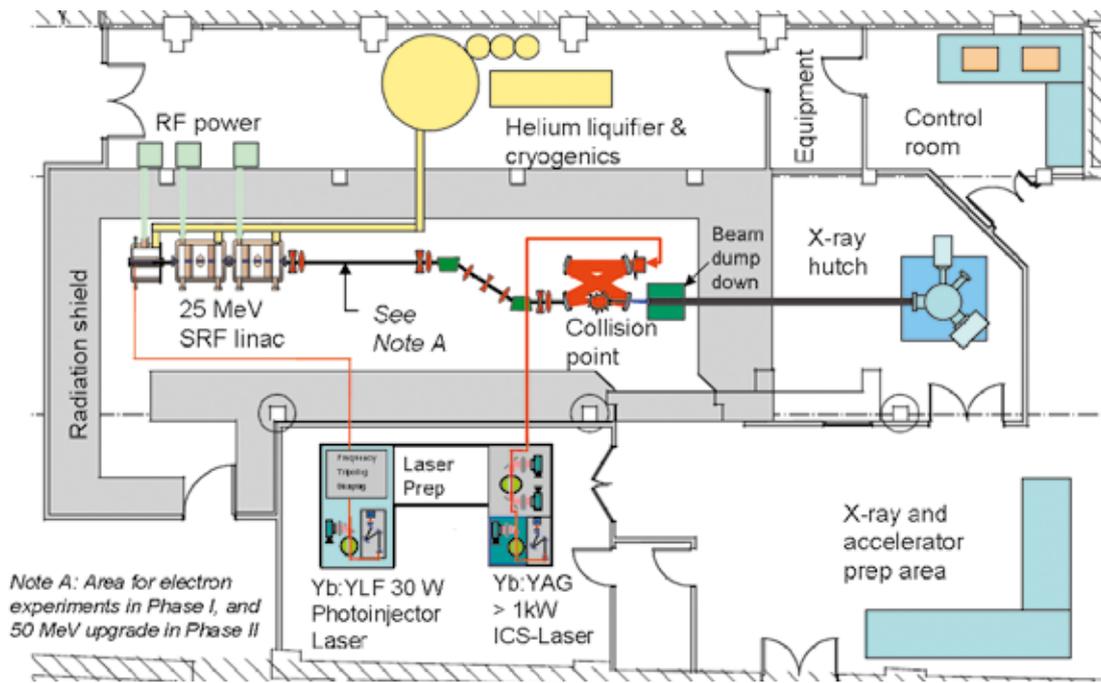


図 4 : MIT で計画されている小型光源の概念図

表 1 : それぞれの装置の平均光輝度 (設計値) のまとめ

装置名	エネルギー [keV]	平均輝度 [ph/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%bw]	強度 [ph/s/0.1%bw]	パルス幅 [ps]	繰り返し [MHz]
JLAB	7-50 100-3000	10 <sup>8</sup>	10 <sup>9</sup>	0.3	75
KEK	0.1-50	10 <sup>16</sup>	10 <sup>13</sup>	5	163
Lyncean	7-70	10 <sup>12</sup>	10 <sup>11</sup>	100	65
MIT	0.8-50	10 <sup>15</sup>	10 <sup>12</sup>	0.3	100
THOMX	50-90	10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup>	20	25

表 2 : それぞれの装置のピーク光輝度 (設計値) のまとめ

※赤字は実証済み

装置名	エネルギー [keV]	ピーク輝度 [ph/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%bw]	パルス強度 [ph/shot/0.1%bw]	パルス幅 [ps]	繰り返し [Hz]
BNL	1-30	10 <sup>18</sup>	10 <sup>6</sup>	4	10
LBNL-LPA	10-10k	10 <sup>22</sup>	10 <sup>4</sup>	0.003	10
LLNL	400-5k	10 <sup>21</sup>	10 <sup>6</sup>	1	10
MIT	0.8-50	10 <sup>23</sup>	10 <sup>8</sup>	0.5	10

てきていることが示された。

まとめとしては、以下のような特徴を示すことで ICS が有力な光源であることを結論付けた。

- ・小型
- ・比較的 low コスト
- ・エネルギー可変
- ・高輝度（サイズとコストに対して）
- ・短パルス
- ・偏光制御

ただし、

- ・インコヒーレント（現状）
- ・数本のビームラインのみ設置可能
- ・輝度は放射光源のそれに到達していない

と注意書きを加えた。

今後の課題としては、

- ・ミラーの破壊
- ・高繰り返し、高強度 (kW クラス) レーザー技術
- ・高繰り返し、高輝度電子源及び光陰極
- ・低コストの超伝導技術開発

などが挙げられた。

12 日午後には再び全体セッションにてそれぞれのまとめが報告された。ICS に関しては前述の通りである。

“Laser HHG” のまとめでは特に縦横ともにフルコヒーレントかつ超短パルスであることが強調された。平均強度としては  $50\mu\text{W}$  (at 50eV)、パルス強度としては  $1\mu\text{J}$  (at 50eV) が達成されており、今後はより短波長までの HHG が課題とされた。

“Laser Plasma Sources” のまとめとしては、近年のレーザープラズマ光源の短波長化が示され、かつ低コスト・実績ある (VUV/ 軟 X 線領域) 装置であることが強調された。また、第 3 世代放射光源レベルの高ピーク輝度であることも本光源の特徴である。現在の X 線強度は  $6 \times 10^6\text{ph/pulse}/0.1\%bw$  で、5kHz で動作可能とのまとめであった。

“Plasma Accelerators” のまとめでは近年のレーザープラズマ加速 (プラズマウェイクフィールド加速) 技術の急速な発展とその成果から結び付けられる小型 X 線 FEL や ICS を用いることによる数 MeV オーダーの小型  $\gamma$  線源の可能性に関して議論された。現在のところ高繰り返し化が今後の課

題として挙げられた。

“Compact Synchrotrons” に関しては近年の偏向電磁石の強磁場化によって 60 ~ 80m の周長の蓄積リングで 1.5 ~ 2GeV の電子を蓄積でき、ALS の偏向電磁石ラインと同等の  $4 \times 10^{13}\text{ph/s/mrad}^2/0.1\%bw$  (at 8keV) が得られることが示された。この光源の利点として多数のビームラインが設置可能であることや R&D がほとんど必要ないことが挙げられた。一方、小型とされていても他の小型光源に比べ大きいこと、短パルス化が難しいことなどが挙げられた。

ワークショップは朝早くから夜遅く (初日は 22 時頃まで) まで行われ非常にハードながらも有意義なものであった。世界の一流研究者たちと 3 食を共にしながら様々な議論・情報交換を行うことができ、我々の量子ビームプロジェクトについても非常にインパクトを持って伝えられたことは大きな成果であった。以上のように世界の最先端の研究者が集合したワークショップであったことで情報量が非常に多く、ICS 以外の小型光源に関してはかなり端折った報告であったことを最後にお詫びしたい。

- [1] “Science and Technology of Future Light Sources” SLAC-R-917
- [2] M. Bech et al., Journal of Synchrotron Radiation, Vol. 16, (2009)43
- [3] THOMX Conceptual Design Report, LAL RT 09/28
- [4] K. Sakaue et al., Review of Scientific Instruments, Vol. 80, No. 12 (2009) 123304. (現在までの成果)
- [5] 高輝度光子ビーム源開発室ニュース Vol. 3 『超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発』(量子ビームプロジェクト全体計画)

## ■超伝導加速空洞開発の進展

早野仁司

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設



### 序文

超伝導加速器開発を進めている STF 施設では超伝導加速空洞の高電界化に力を入れて開発しているが、その加速性能はもとより、大電力運転、熱負荷性能、高精度周波数補正、高精度アライメントなどのビーム加速に必要な機能の高度化開発も行なっている。加速性能を上げるための開発としては、空洞製造時の電子ビーム溶接技術研究や表面欠陥の研究、表面処理の研究が行なわれている。これらの研究開発の進展について報告する。

### 超伝導 RF 開発設備 (STF)

KEK は、2004 年の時点で、TRISTAN 電子陽電子コライダー加速器において世界にさきがけて超伝導加速技術の大規模な応用に成功しており、つづく KEKB コライダーと合わせて 20 年以上におよぶ経験と人材を持ち、平行して空洞単体の加速電界改善研究においても世界をリードする成果を得ている。これらを生かして、2005 年からリニアコライダー用の超伝導線形加速器の開発、ERL 超伝導加速器の開発などを総合的に行なう超伝導リ

ニアック試験施設 (STF) を建設し、超伝導空洞技術の線形加速器への系統的応用の開発研究を行なっている。「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」課題はこの STF 設備にレーザー技術を応用して高輝度光子ビーム源開発研究を行なう計画である。その STF 施設は旧陽子リニアック棟内に建設され、以下の項目を目的としている。(1) 超伝導加速技術に関連する諸基盤施設をできるだけ一つの建屋のもとに相互に近接して構築し、稼働させ、有機的連携を計る。(2) 基盤設備建設と並行して、ILC 超伝導加速技術を獲得するべく超伝導加速モジュールを段階的に建設し、運転する。(3) これらを通して、超伝導加速技術を KEK および日本そしてアジアの大学・研究所グループが漸進的・総合的に習得し、その途上で日本の人材育成をし、また海外研究機関との共同研究拠点ともする。(4) 同時に、ILC 以外の加速器への超伝導空洞技術の応用にも一定の寄与ができるよう、ILC に限定しない施設整備を行う。これらの目的に沿うように STF 設備構築は、Phase-1 と Phase-2 の 2 期に分けて開発を行なっ

ている。

Phase-1 (STF1) では基盤設備の立ち上げをおこなう。また、ILC 用超伝導空洞の開発と試作、そしてこれらを納めた横置きクライオスタット (クライオモジュール) の 2K 冷却時のパルス RF による動作実験を試験的におこなう。具体的には、ILC 半サイズのクライオモジュールに超伝導空洞 4 台を据え付け、5MW の L-バンドクライストロン 1 台で動作させる試験実験をおこなう。これを通して、ILC 仕様に近い超伝導加速モジュールを建設し、それに必要な各機器の設計・製作・試験を通して、各担当グループが一渡りの経験を積む事を目的としている。

Phase-2 (STF2) では ILC 線形加速器のプロトタイプを建設し、ビームを使った運転試験を行う。具体的には、リニアックの基本ユニット 1 台を建設し、ビーム加速を含む定常運転を行い性能実証する。これを通して ILC の性能仕様と実装仕様の双方を満たす各機器の設計・製作・試験に関する実務的経験を重ねる。そしてこれと並行して、生

産技術の工業化を検討し準備する。「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」課題はこの Phase2 の初期段階の装置にレーザーを組込んで行なう事になる。

図 1 に STF 棟内の各設備の配置を示す。

以下、STF 棟内設備の機能について概説する。

●空洞検査関連設備

空洞内表面の内面検査カメラによる内面異常検出、空洞外寸の確認、加速モードと高調波モードの空洞共振周波数などの RF 測定、および空洞の各セルを個別に塑性変形させることによるセル周波数調整が含まれている。

●空洞表面処理設備

製造会社からのベアな 9 セル空洞は、各種検査に加えてアニーリング、フランジおよび空洞内表面の化学研磨、電解研磨、各種洗浄、ベーキングなどの工程が含まれる。これらの工程をなるべく近接したストリームライン化した清浄な環境下で

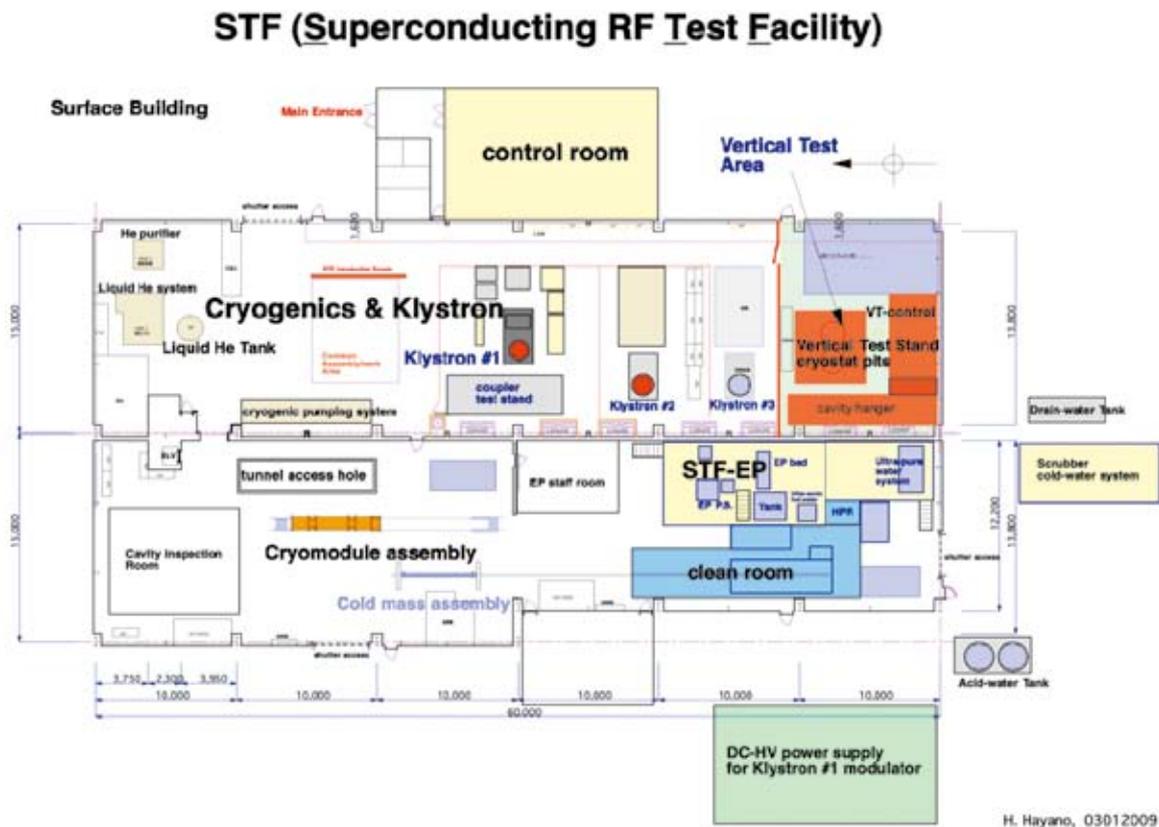


図 1 : STF 棟内の各設備の配置。地下トンネルがこの直下に設備されている。

行うことを目的として、表面処理設備とクリーンルームとを近接させて建設した。表面処理設備のなかでも重要な設備は電解研磨設備である。電解研磨処理直後の工程は1次洗浄、超音波洗浄、高圧超純水洗浄、乾燥封止、真空引き、そしてベークングというものである。

#### ●クリーンルーム

空洞表面処理直後の封止、真空引きと、空洞パッケージへの大電力入力カップラーへの取付けおよび空洞パッケージの多連化の工程の際に高度な清浄環境を必要とする。これらのために、表面処理設備西に隣接して、ISO Class-4 および6のクリーンルームを建設した。

#### ●空洞縦測定試験設備

表面処理を終えた空洞は、縦測定試験設備にて、低電力のCW-RF源を使って性能測定を行う。測定するのは、Q値、限界加速電界、付随するRF諸特性、Field Emissionに伴うX線線量、空洞クエンチ時の発熱分布などである。これには4m以上の細長い縦型クライオスタットを使用する。

#### ●空洞組立関連設備

表面処理を経て低電力RF試験での性能確認も終えた9セル空洞は、工場にて液体ヘリウムジャケット容器に納められ（この状態になったものを「空洞パッケージ」と呼んでいる）、再びKEKに送り返される。クライオモジュール（横置きクライオスタット）内部への据え付け前に、一つ一つの空洞パッケージに大電力入力カップラーを取り付ける必要があり、また、多連空洞とする場合には、隣接空洞間の連結を行わなければならない。入力カップラー取り付けと多連化はクリーンルームで行なわれ、その後クリーンルームから引き出され、クライオモジュール内部アセンブリの所定の箇所につり下げられ、運転のために必要な各種配管、信号線、熱シールドを取付けられた後、クライオモジュールの真空容器の中に納められる。

#### ●RF源関連設備

クライオモジュールを地下に設置してパルスRF運転を行うために必要な大電力RF源は、STF棟建屋地上部の東側中央部に設備することとし

た。STFで必要なクライストロンの台数は3台である。この大電力パルスRF源は、入力カップラープロセッシング、RF電子銃空洞、クライオモジュールの空洞に使用される。LLRFフィードバック制御はJ-PARC用に開発されたデジタル制御ものをベースにして開発している。

#### ●冷凍機

冷凍機設備はAR棟から移設した。屋外に設置するコンプレッサーなどとの接続連携、地下トンネルに設置するクライオモジュールへの液体ヘリウムの輸送、2Kへの冷却に必要な減圧ポンプなどの配置の便も考え、STF棟建屋地上部の北東端に設営し、液化機や液体ヘリウムタンク、ヘリウム精製機などを配置した。地上冷凍機で製造した液体ヘリウムは、トンネル内のコールドボックスに供給され、コールドボックスとクライオモジュールを接続してモジュール内の空洞ジャケットへ液体ヘリウムを供給する。運転温度は2Kである。

#### ●電子ビーム設備

電子ビーム源は、Cs-Teフォトカソードを用いたRF電子銃をマルチバンチレーザーで駆動して、電子ビームトレインを生成し、加速空洞に通じて加速電界性能確認ができるようになっている。これには1.3GHz常伝導空洞を使用したRF電子銃空洞を使用している。

#### 超伝導加速モジュール開発の進展

STF Phase-1 (STF1) では、9セル加速空洞を4台装備したクライオモジュールを地下トンネルに配備し、地上に設置したLバンド(1.3GHz)5MWクライストロン1台からのパルスRF電力によって試験運転した。空洞の加速電界の性能限界は大きな課題であるが、加速器システム構築の総合的観点からは、他にも多数の検証を要する機材・部品が存在する。たとえば、空洞チューナー(周波数の微調整装置)、空洞カップラー(マイクロ波入力部分)、空洞HOMカップラー(加速モード以外のマイクロ波を逃すための機構)、空洞磁気シールド、クライオスタット、これらに付随する異材継ぎ手や真空シール、熱シールド、マイクロ波源とその輸送システム、冷凍機、制御系などの個

別機材、およびそれらの総合したシステムである。加速電界の問題とは分離したうえでの STF1 で行う加速モジュールの総合性能検証実験項目は以下の通りである：(1) 空洞システム、(2) ローレンツ離調(加速電界が高いときに周波数がずれる現象)の補正システム、(3) 入力カプラーの大電力性能、(4) HOM カプラーの動作確認、(5) 冷却時の熱収縮、(6) クライオモジュール、(7) 熱損失性能の確認、(8) アライメント機構の性能、(9) マイクロ波源、(10) クライストロンの性能、(11) マイクロ波分配回路の性能、(12) 制御系によるフィードバック安定化性能、である。

これらの試験は TESLA 改良型空洞 4 台をクライオモジュール A に組み込み、そのクライオモジュール A を、2008 年 5 月から 12 月までの間に夏期シャットダウンをはさんで 3 回の冷却試験を行なう中で評価試験を行った。使用した空洞の電界性能は図 2 の赤色バーグラフに示すように、加速に使用するパルス幅 1.5ms の時に、それぞれ、20MV/m、22MV/m、32MV/m、20MV/m であり、1 台は目標の運転勾配 31.5MV/m を超える性能であった。

それらの中でもっとも加速勾配の大きな空洞(#2 空洞)はローレンツ離調も大きいので、その離調補正の実証試験に最適である。ローレンツ離調の補正はチューナーに組み込まれたピエゾアクチュエーターにより離調を阻止する向きにパルスの伸張させることを行なう。その補正の様子を図

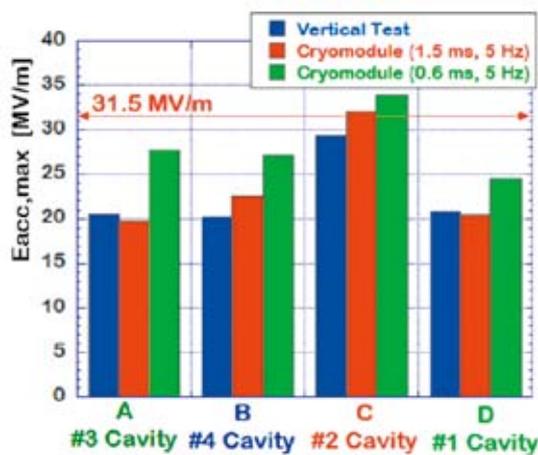


図 2： 加速モジュールに使用した4台の空洞の電界性能。青バーが縦測定時の電界、赤バーが1ms パルス幅 (ILC 仕様値) の時の電界、緑バーは 0.6ms にパルスを縮めた時の電界。

3 および図 4 に示すが、パルス内振幅位相フィードバックが効果的となるための仕様値 +/-50Hz に納める事でできる事を示している。

加速空洞 4 台の同時運転の実証も重要な項目である。これには各空洞のローレンツ離調補正はもちろん、空洞からピックアップした RF 信号をビームが見る位相でベクトル合成した信号に変換し、それを安定化するための高精度デジタルフィードバックを試験する事で行なう。これには高速度で演算しクライストロン入力 RF にフィードバックをかける FPGA および AD,DA が使用される。その結果を図 5 に示す。図 5 左列のベクトル合成された信号が電圧で 0.04%rms、位相で 0.02 度 rms に安定化されており、非常に高安定である事が実証された。

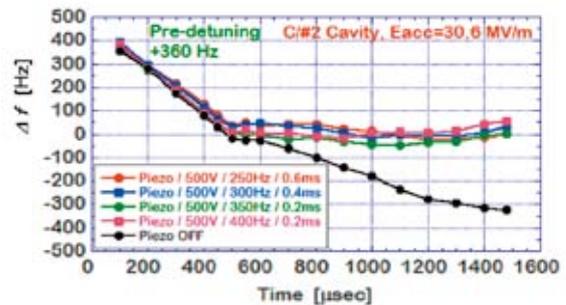


図 3： #2 空洞のローレンツ離調補正の様子：黒線が未補正での離調量、その他の線は各パラメーターでの離調補正ありの離調量。500 μs から 1500 μs までの 1ms がパルスフラットトップ。

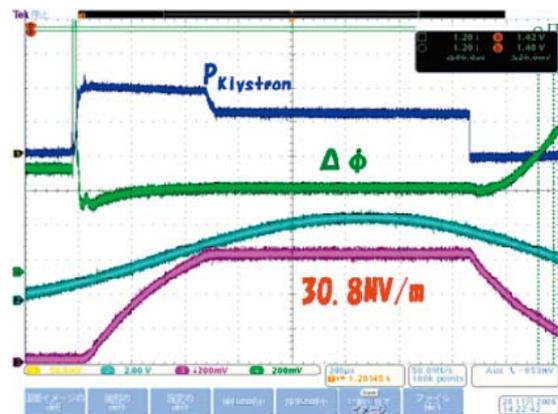


図 4： #2 空洞のローレンツ離調補正のピエゾオンでのパルス波形の様子。青緑波形がピエゾにかけている電圧波形であり、ピンク波形がその時の電圧波形である。補正の結果、1ms のパルスフラットトップにおいて平坦である事がわかる。

## 超伝導加速空洞の高度化開発

超伝導空洞の高度化開発の重要なテーマである高電界化は、空洞検査装置の開発とそれにより見つかった内面欠陥の対策、そして、表面処理の内表面におよぼす影響と空洞取扱のダスト混入が原因であろうフィールドエミッション対策という2つの面から研究開発が進められている。

### (1) 内面欠陥の検査と対策

20MV/m以下の加速勾配で急激なクエンチを起こしてパワーがそれ以上入らなくなる現象に対して、空洞外面に温度センサーを配置して、そのクエンチ場所を同定する方法が一般的に取られている。この方法を9セル空洞に応用するために多数の温度センサーを配置してクエンチ場所を同定する温度マップ装置がKEK STFにて開発されている。図6にその写真と温度マップデータ表示の様子を示す。温度センサーの間隔は3~5cm間隔でももに赤道部付近を観測している。このシステムにより場所が同定されると、その場所に内面力

メラを差し込んで非接触で内面の状態を観察する。内面カメラはピクセルあたり7 $\mu$ m程度の高分解能で内面の異常を見る事が出来る。特に工夫されているのは照明方法である。空洞内面は電解研磨により鏡面状態になっているので、コントラストよく凹凸を観測するためには工夫された照明が必要である。図7にその内面カメラを示す。いままで、相関が見られたのはクエンチ場所には数100 $\mu$ mの大きさのピットやバンプが見られた事である。これらは、製造工程、とくに電子ビーム溶接時に発生したものと考えられる。これらの観察事実はすでに製造現場にフィードバックされており、製造直後に内面検査することで、早急な対策がなされるようにしている。また、9セル空洞に仕上がってから発見されたこのような欠陥を局所研磨により取り除く開発も行なわれており、2~3台の空洞に対してこの技術が応用され、20MV/m以下だったものが30MV/m程度まで電界性能が改善できる事が実証されている。

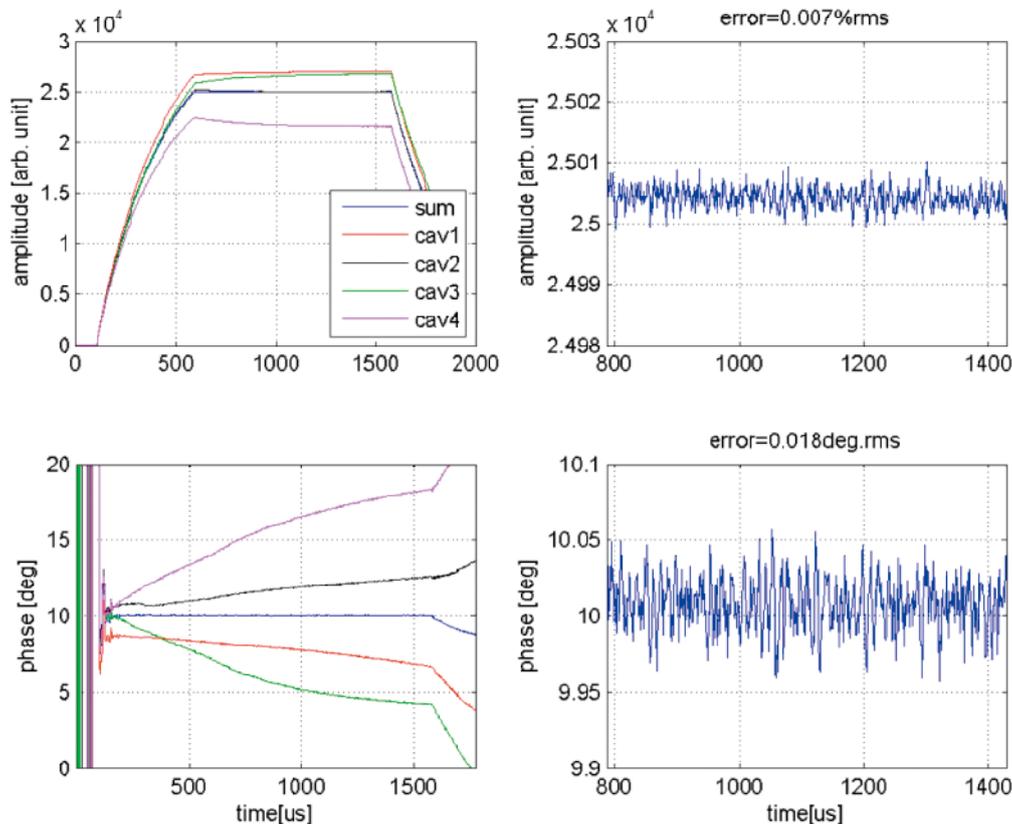


図5：4台の空洞の合成運転時の電圧波形と位相波形。左列は各空洞の電圧波形と位相波形。右列はフラットトップのみを拡大して抜き出した4台のRF信号のベクトル合成時の電圧波形と位相波形。ビームは合成波形で加速されるので、そこでの平坦度がエネルギー広がりを決めるが、電圧で0.04%rms、位相で0.02度rmsという平坦さで加速される事になる。

## (2) フィールドエミッション抑制の開発

20MV/m より高い電界時に多く見られるが、多量の X 線を発生させながら温度上昇も起こし Q 値が落ちていってクエンチに至る現象は、内面からの多量の電子放出(フィールドエミッション)を起こしている物と考えられている。この現象の検出と分析には X 線マップ装置が用いられている。多数の PIN フォトダイオードを利用した X 線検出素子を空洞に配置して、放出電子のパワー密度が大きい部分を同定する試みである。このような現象でクエンチした空洞の温度上昇部分を内面カメラで観察しても異常はみられない。このようなフィールドエミッションを抑制するために内表面を SEM や XPS などの分析機器を活用して内表面の残留物を検査する方法を開発中である。また、抑制策として、電解研磨処理中の酸化膜の制御、界面活性剤による付着物や析出物の除去、物理的洗浄法などの各種洗浄方法の研究などが精力的に行われている。処理中の異常な酸化膜の抑制のために処理中に窒素ガスフローを行なう事が提案されている。また、電解研磨中に生成されるイオウを抑制する電解研磨パラメーターも実験的事実をもとに提案されてきており、1~2年の内にフィールドエミッションに対する対策ができるようになり、30MV/m を超える電界性能をもつ空洞を再現よく製造できるようになるであろう。

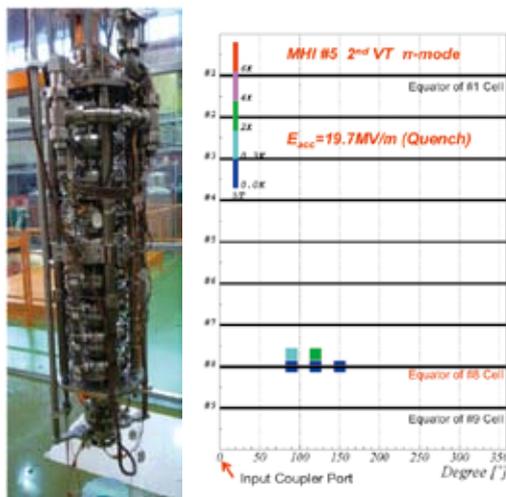


図 6：超伝導空洞の縦測定時に取付ける温度マップ装置とそれによる温度上昇マップ図。これにより、どの部分が異常温度上昇をしているかがよくわかる。



図 7：超伝導空洞の内面を高分解能で検査する内面カメラ装置。これにより、異常温度上昇をしている部分と内表面の欠陥や異常との関連を取る事ができる。

## Acknowledgments

This News is supported by Quantum Beam Technology Program of the Ministry of Education, Science, Sports, Culture and Technology of Japan (MEXT).

## 量子ビーム基盤技術開発プログラム (2008-2012 年度)

Quantum Beam Technology Program supported by MEXT

次世代ビーム技術開発課題「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」(拠点責任者：浦川順治)  
Development for Next Generation Compact High Brightness X-ray Source using Super Conducting RF Acceleration Technique



大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)  
High Energy Accelerator Research Organization  
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1 TEL 029(879)6248