

Page #		Comments
学術P.7	超伝導	超伝導高周波加速管の加速勾配の設計基準値は、現時点での達成可能な技術レベルに基づいて 35 MV/m とされている。これを確実に <u>歩留まり良く</u> 実現することは必須であり、更なる性能向上も望まれる。
学術P.7	超伝導	数多くの超伝導高周波加速管が、参加各国の分担によりインカインド（現物）で供給されることが想定されていることから、それらの <u>整合性の担保を含む品質管理</u> は重要なポイントとなろう。
有識者 P.5, 42	全般	ビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等についてはいまだ課題が多い。
学術P.7	陽電子源	準備期間において、 <u>回転ターゲット</u> のプロトタイプ作製と陽電子源直後の磁場による収束系開発を進め、準備期間の2年目までにはどちらの方式を採用するか技術選択を行う必要があるとしているが、開発コストも考慮して方針を明確にすべき。
有識者 P.42	アンジュレータ陽電子源	また、陽電子源で想定されているヘリカルアンジュレータ方式では、アンジュレータから放射されたガンマ線を照射して陽電子を生成するターゲットの熱負荷対策や、不具合の生じた放射化しているターゲットの交換方式などがまだ開発途上の技術であり、開発コストも含めて技術の選択を行うべきである。
学術P.7	アンジュレータ陽電子源	陽電子源のヘリカル・アンジュレータ方式は技術的に未経験で多くの開発要素を含んでいる。
学術P.7	電子駆動陽電子源	陽電子源の従来型ターゲット方式は所定のビーム強度を安定的に得ることは決して容易な達成目標ではない。
学術P.7	BDS	ビーム収束及び位置合わせに関する制御・フィードバック系に関する技術の確立や、衝突点サイトにおける常時微細動の許容レベルに関する定量的評価が必要。
有識者 P.42	ビームダンプ	特に、 ビームダンプ については、衝突エネルギーが500GeVから250GeVになったことで、設計の尤度は増加したものの、ハイパワーのビームを定常的かつ高い信頼性をもって受け続けられる窓の耐久性や窓の定期的な交換作業技術、耐震性能等を含め、本準備期間においてダンプシステムとして技術を完成させる必要がある。
学術P.8	ビームダンプ	窓材の健全性モニタリング、遠隔操作による <u>交換作業システム</u> の具体的設計、高エネルギービームと水との反応で起こる事象の詳細については、準備期間に十分な検討が進められなければならない。

3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等

(超伝導高周波)

SCRF

Technology Confirmation

有識者会議・学術会議の指摘 Advisory Panel & SCJ

- 超伝導高周波加速管の加速勾配の設計基準値は、現時点での達成可能な技術レベルに基づいて **35 MV/m** とされている。これを確実に歩留まり良く実現することは必須であり、更なる性能向上も望まれる。(学術会議 p. **High gradient with reliable yield**)
- 数多くの超伝導高周波加速管が、参加各国の分担によりインカインド(現物)で供給されることが想定されていることから、それらの整合性の担保を含む品質管理は重要なポイントとなろう。(学術会議 p. **7) Quality Control of cavities from various countries**)

2018年以降の取り組み

Activity Since 2018

例

日米ディスカッショングループのもと日米協力による性能向上・コストダウンの開発が進められている(2018年度より)。日独・日仏協力による性能向上・コストダウンの開発が開始(2020年度より)。超伝導技術を使った大型加速器としては欧州(ドイツ)のEuro-XFEL以降に、米国のLCLS-IIが建設中である。(中国でもSHINE計画が進行中)国際的に大型加速器の建設が続いている。

インカインド供給される空洞やクライオモジュールについての規格をIDT-WG2で国際的に議論している。特に高圧ガス保安法対応については、日本国内での検討と共に海外の研究者とも協議を始めている。

次にステップは、これまでのコストダウン研究開発の成果が歩留まりよく再現でき、また海外で製造したクライオモジュールが規格通り性能が出るかを実証すること。

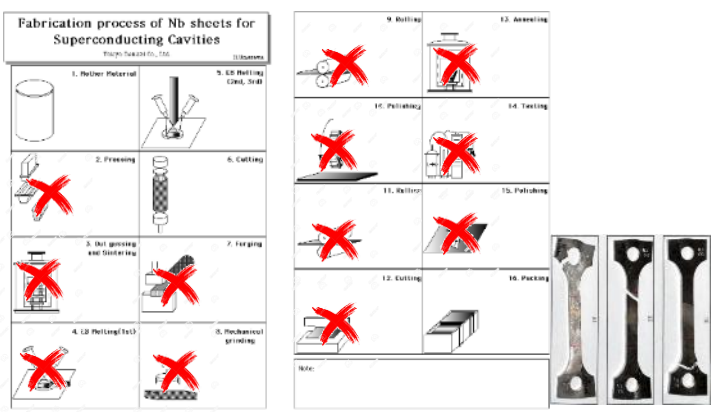
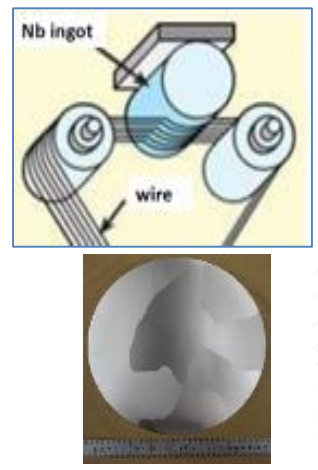
2019年10月にKEKの国際WGにより技術課題への対応が議論され、取り組みと国際協力の候補となる国が報告書に記載されている。

準備期間に国際協力で課題を解決するよう、IDTで検討を行っている。

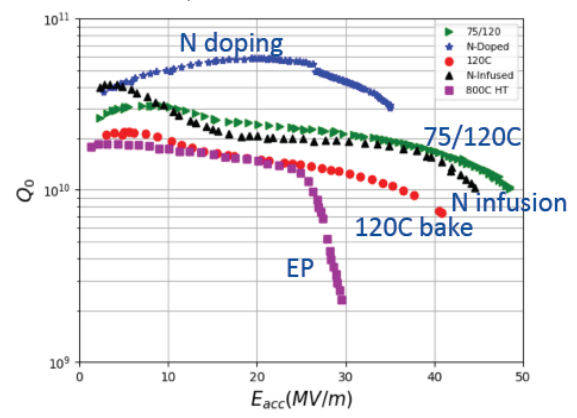
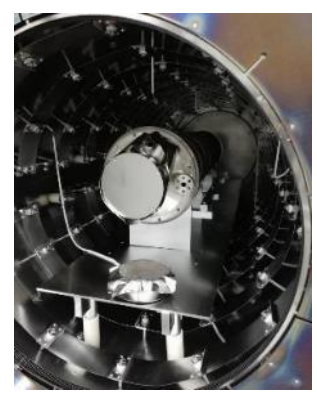
できる
れ以上

数枚で図を入れてこれまでの成果を記載

図の確認
図の説明追加



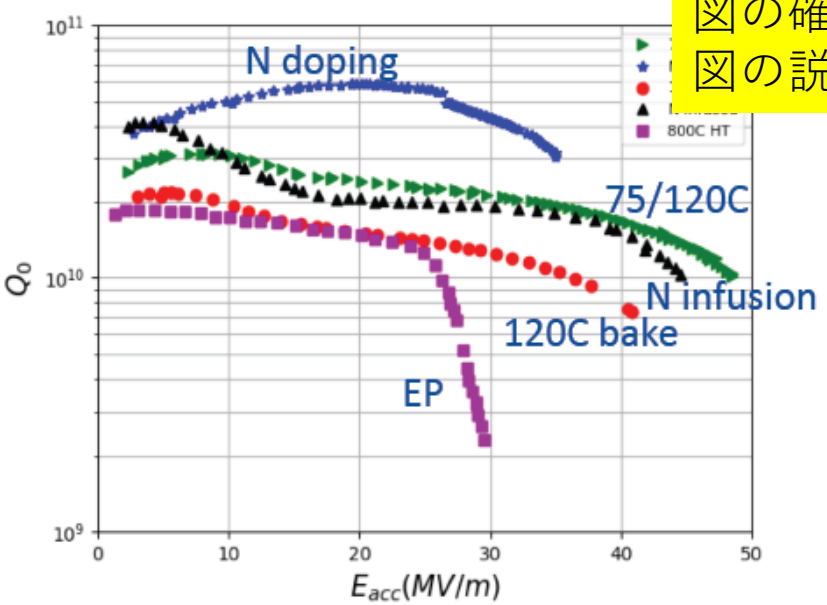
- 昨年度までにダイレクトスライス材で2台の空洞を製造。性能は32 および 34 MV/m (仕様：35 MV/m).
- 材料強度についても引き続き研究



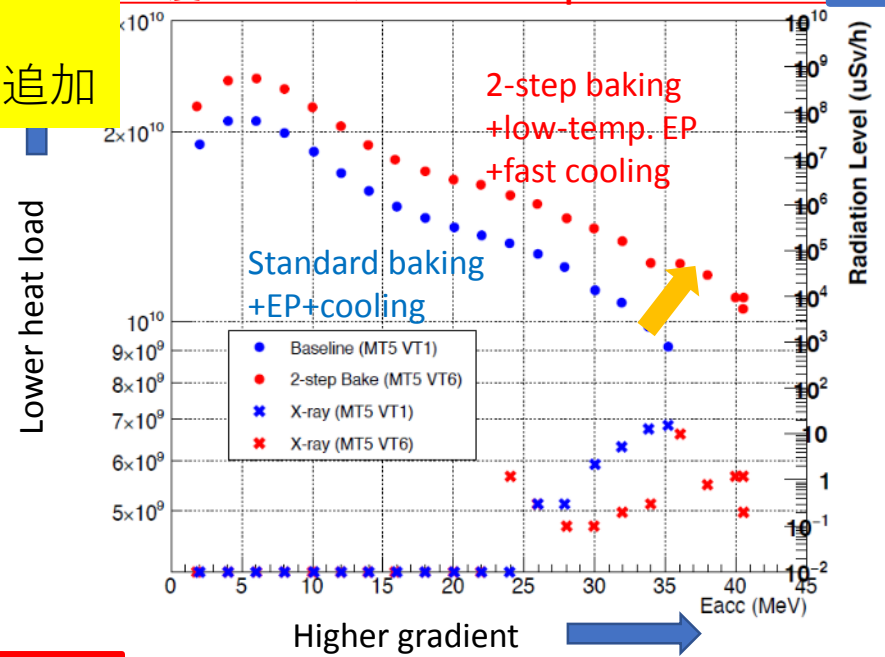
- 昨年度N-Infusion処理を行った空洞をSTF-2加速器にインストール
- 今年度からは75/120CやNdopingといった表面処理方法も評価を進めている。

数枚で図を入れてこれまでの成果を記載

図の確認
図の説明追加



“75度ベーキング”+“Low-temp.EP”+“fast cooling”



High Gradient Cryomodule (HGC)

- Present ILC spec 31.5 MV/m (per TDR)
- Many new advances in SRF technology since ILC TDR. New treatments may enable significant reduction in ILC cost: flux expulsion, 75/120 two-step bake C, cold EP (processing sequence stays s
- Supported by ILC Cost Reduction R&D funds from DOE, Fermilab plans to assemble a cryomodule w
- cavities with new treatments.
- Goal is to reach higher gradient than has ever been demonstrated in CM test
- Aim will be 38 MV/m average gradient with $Q_0 > 1.0 \times 10^{10}$ and a stretch goal of 40 MV/m
- Achieving this would be a key demonstration of the potential for cost reduction for ILC
- Will reuse CM1, the first SRF cryomodule assembled at Fermilab in 2007 – as a part of a collaborati
- between Fermilab, DESY, and LASA



High Gradient Cryomodule (HGC)

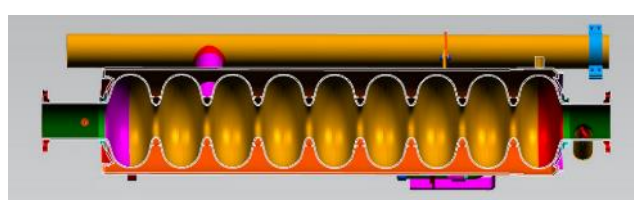
- Encouraging international participation in HGC. Contributions under discussion:
 - Cavities, cavity performance R&D, advanced cleanroom assembly techniques, magnetic shielding, cryomodule testing, and more
- Labs involved to date:



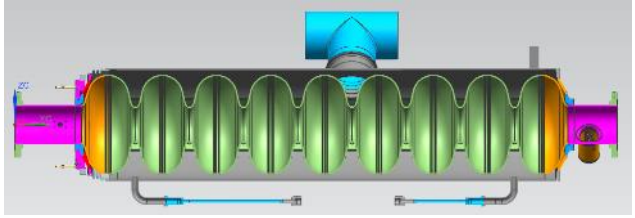
数枚で図を入れてこれまでの成果を記載

図の確認
図の説明追加

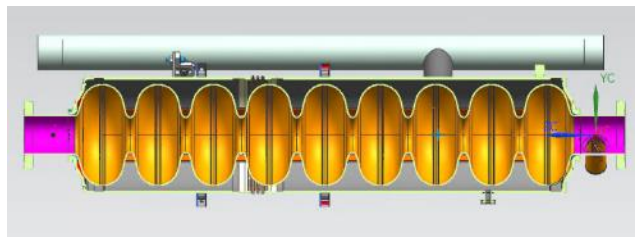
E-XFEL
(Long-Short)



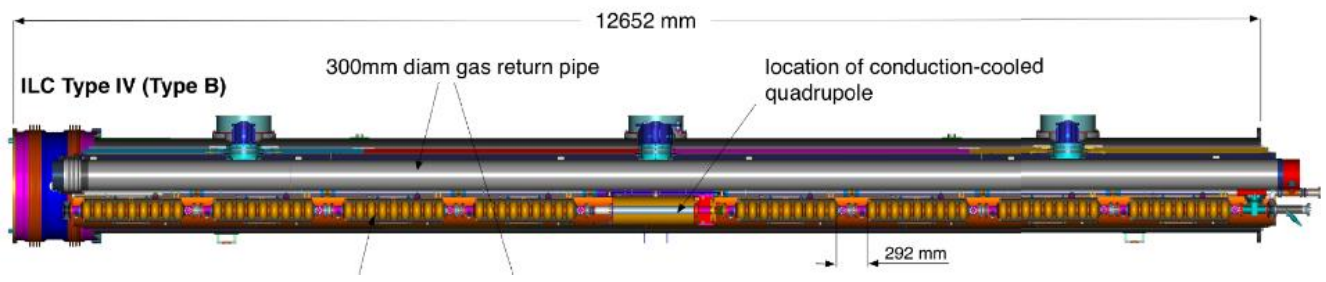
LCLS-II
(Long-Short)



ILC T4CM
(Short-Short)



ILC T4CM
(Short-Short)



有識者会議・学会議の指摘

- ビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等についてはいまだ課題が多い。(有識者会議 p.5,12)
- 準備期間において、回転ターゲットのプロトタイプ作製と陽電子源直後の磁場による収束系開発を進め、準備期間の2年目までにはどちらの方式を採用するか技術選択を行う必要があるとしているが、開発コストも考慮して方針を明確にすべき。(学会議 p.7)

Rotating target and magnetic focusing

2018年以降の取り組み

例

陽電子源については、2つの方式で異なるトンネル構成が必要。このため、電子駆動方式は、別トンネルに設置し、アンジュレータ方式のスペースは将来の偏極陽電子へのアップグレードのために確保することとした(後からアンジュレータシステムを設置可能)。アンジュレータ方式を選択した場合、電子駆動方式のための別トンネルは建設されない。

IDT-WG2での検討により、陽電子源について残された研究開発のための十分な時間を確保するために、準備研究所の3年目の半ばに技術選択することを予定している。

電子駆動型陽電子源については、大学・KEKと協働で、概念設計が2019年春に完成している。土木施設と詳細設計をIDTのもとで進めている。2019年10月にKEKの国際WGにより技術課題への対応が議論され、取り組みと国際協力の候補となる国が報告書に記載されている。

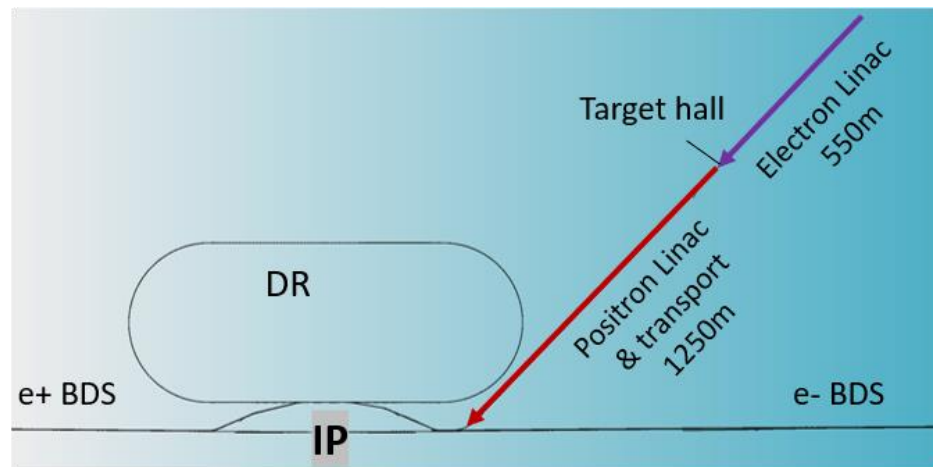
準備期間に国際協力で課題を解決するよう、IDTで検討を行っている。

陽電子源の配置

Configuration of Positron Sources

- 始めにアンジュレータ型を建設する場合はそれが最終的な形となるが、電子駆動型で開始する場合は、のちにアンジュレータ型を追加できるようにしておくことが求められる（置換えるのは得策ではない）
- その場合、アンジュレータ型の下流の主トンネルに電子駆動型を配置するより、電子駆動型専用別のトンネルにしたほうが、建設・維持・試運転などに都合がよい。
- 始めからアンジュレータ型の場合はこの別トンネルは建設しない。

- 右図は電子駆動型トンネルの配置の一例である。45度の方向に置くことを決めたわけではない



3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (アンジュレータ型陽電子源)

Undulator Positron

有識者会議・学会議の指摘

- 陽電子源で想定されているヘリカルアンジュレータ方式では、アンジュレータから放射されたガンマ線を照射して陽電子を生成するターゲットの熱負荷対策や、不具合の生じた放射化しているターゲットの交換方式などがまだ開発途上の技術であり、開発コストも含めて技術の選択を行うべきである。(有識者会議 p.42)
- 陽電子源のヘリカル・アンジュレータ方式は技術的に未経験で多くの開発要素を含んでいる。(学会議 p.7)

2018年以降の取り組み

例

IDT-WG2では特にハンブルグ大学が中心となってターゲットの熱負荷対策について議論を行っている。ターゲット交換方法については、電子駆動型陽電子源で設計検討が進められており、同様の遠隔交換システムを想定している。

ヘリカルアンジュレータについては、必要な磁場を出すプロトタイプは以前に製作され良好な結果を得ている。さらなるパラメータ最適化について、米国研究所などが興味を持っている。

できること
れ以上に進む

次のステップは、ヘリカルアンジュレータ型陽電子源の主要コンポーネントについて詳細設計・パラメータ最適化に必要な研究開発を国際協力で進めること。

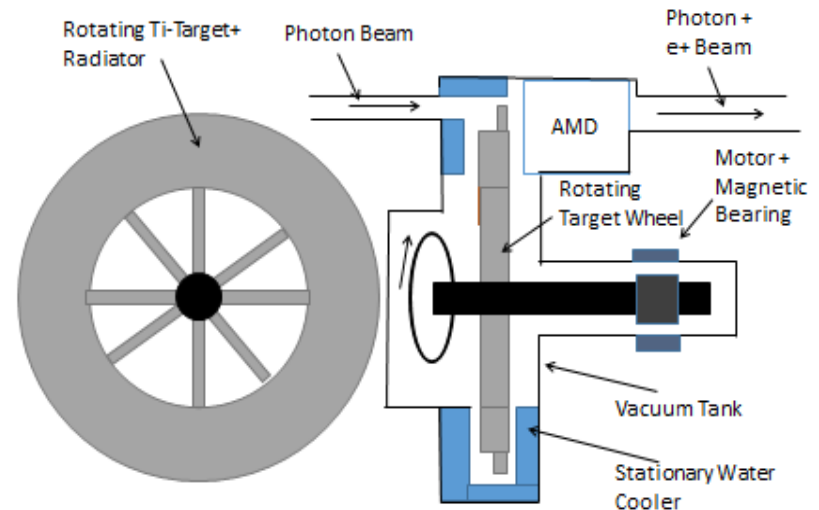
2019年10月にKEKの国際WGにより技術課題への対応が議論され、取り組みと国際協力の候補となる国が報告書に記載されている。

準備期間に国際協力で課題を解決するよう、IDTで検討を行っている。

- アンジュレータ型の場合、開発研究を要するのは、標的およびその直後の陽電子収束システムの製作・試験が終わって、詰めの計算を以前にプロトタイプのみで行うのである。
- 標的は、真空中に置かれた、車輪型の直径1mのチタン合金で縁辺速度100m/sで回転させる必要がある。チタン合金の性質は実験で十分に確かめられた。
- 焦点は冷却方法であるが、現在では放射冷却方式に固まっている。この場合、真空では封じ切で問題ない。冷却速度は計算で確かめられている。回転軸は磁気浮上リングを使う。これらのプロトタイプを準備期間に製作する。

- 収束システムは、QWT (Quarter Wave Transformer) が検討されたが、陽電子収量が足りないのので、現在ではパルスソレノイドの設計が進められている。
- 今後、標的・収束システムのプロトタイプを製作する予定である。

Principal Layout: Ti-Wheel with a Diameter of 1.0 m, rotating at 100 m/s, 2000 rpm.



有識者会議・学会議の指摘

- 陽電子源の従来型ターゲット方式は所定のビーム強度を安定的に得ることは決して容易な達成目標ではない。(学会議 p.7)

2018年以降の取り組み

電子駆動型陽電子源についてはKEKと広島大学、早稲田大学が中心となって研究開発に取り組んでいる。磁性流体を使った回転ターゲットについては、放射線照射による真空シール化評価を進め、また実際のターゲットと同様の重量の模擬ターゲットの長期ランニング試験も行っている。ビーム収束部分の捕獲空洞についてもAPS空洞というビーム負荷変動に対応できる空洞の設計開発が進んでいる。

次は、主要コンポーネント(回転ターゲット、磁気収束回路、APS空洞)のプロトタイプを使った評価が必要な段階である。

放射化した標的の交換システムの設計研究が進められている。これは、アンジュレータ方式の場合もほとんど差はないので、そのための設計も兼ねている。

2019年10月にKEKの国際WGにより技術課題への対応が議論され、取り組みと国際協力の候補となる国が報告書に記載されている。

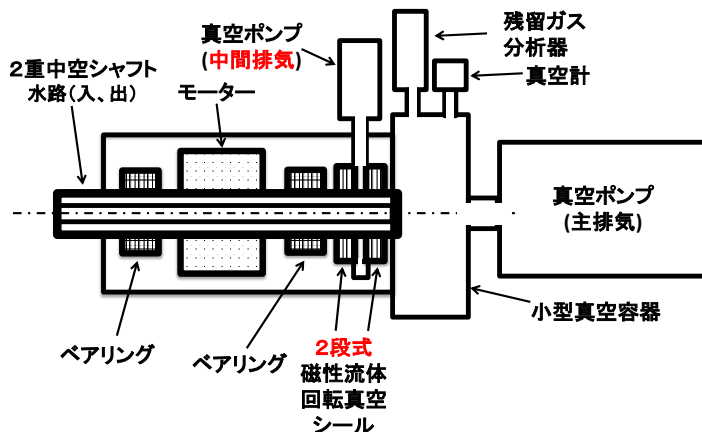
残された課題は難しくないが、これ以上は準備期間に国際協力で解決するよう、IDTで検討を行っている。

例

できる
れ以上

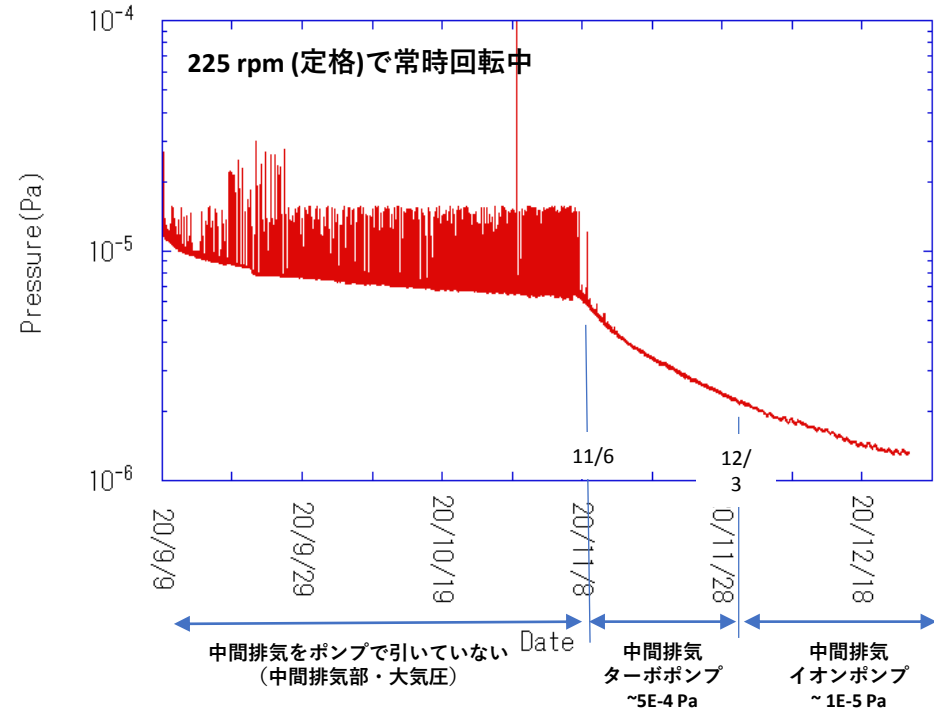
- 電子駆動型の設計の焦点は、標的および最初の加速空洞である。
- 標的については中間排気付きの2段階回転シールで高真空を維持するモデルの回転試験が進んでいる。今後は実機と同じ回転負荷をつけて試験を行う。
- 最初の捕獲加速空洞としては、APS型を採用する。特に重要な点はビーム負荷の補償であり、詳細な設計計算を行っている。

回転ターゲット用軸受(2段階)プロトタイプ



大気側から2段階で安定な超高真空を実現する中間排気付き回転シールにの長期・真空回転試験を行い、突発的な圧力上昇の完全抑止を確認した。

↓
Double Seal



現在模擬ターゲットを付けた回転試験実施中

3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (ダンピングリング)

有識者会議・学会会議の指摘

- ビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等についてはいまだ課題が多い。(有識者会議 p.5,12)

2018年以降の取り組み

例

KEKのATFにおいて、ダンピングリングの入出射システムの高速キッカーシステムの原理実証試験が終了している。

2019年10月にKEKの国際WGにより技術課題への対応が議論され、取り組みと国際協力の役割となる国が報告書に記載されている。

長期安定性試験に使用するキッカーパルサーは、これまでATFの試験で使用してきたDSRD (Drift Step Recovery Diode) パルサーを使用する予定で、準備研究所期間に実施する予定である。

できることはやって
れ以上に進むにはPre

数枚で図を入れてこれまでの成果を記載

図の確認
図の説明追加

3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (ビーム伝送システム)

有識者会議・学会議の指摘

- ビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等についてはいまだ課題が多い。(有識者会議 p.5,12)
- ビーム収束及び位置合わせに関する制御・フィードバック系に関する技術の確立や、衝突点サイトにおける常時微細動の許容レベルに関する定量的評価が必要。(学会議 p.7)

2018年以降の取り組み

例

ダンピングリングの高速フィードバックシステムのシステム設計は、KEKのSuperKEKBは、ILCのダンピングリングに近い円周を有しており、ILC250と同様のフィードバックシステムを採用している。SuperKEKBでのシステム運用経験が非常に重要で、SuperKEKBの担当者とは技術的連携を深めている。次のステップは、SuperKEKBでの実績を基に国際協力でプロトタイプを作成する段階。

KEKのATFではナノビーム技術(ビームを絞り、位置安定化も図る)の開発を国際協力で行ってきた。2020年にはこれまでの国際協力をレポートしてまとめ、国際レビュー委員会で評価していただいている。ビームサイズは2016年には41nmとほぼATFでのゴール(37nm、ILCの7.7nmに相当)に到達、ビーム安定性も多バンチでの安定化に必要な短時間でのフィードバック(仕様の366ns以下を満たす133ns)を実現している。近年は、ビームダクトなどのギャップにより誘起されるWakefield効果の影響評価を進めているところ。

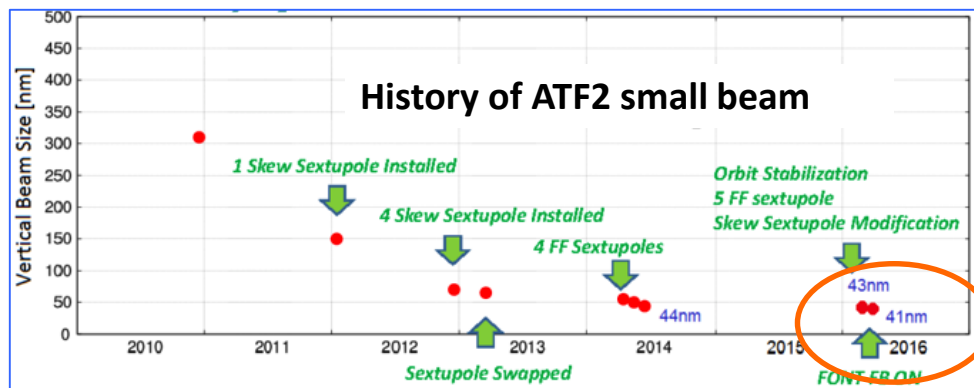
できることはやれ以上に進むに

さらにWakefieldの影響をILCと同様の条件で精査するためには、ビームダクトの変更、ビームモニターの新設・アップグレード、および建物の温度安定化などが必須で、大掛かりなアップグレード(ATF-3)となる。

2019年10月にKEKの国際WGにより技術課題への対応が議論され、取り組みと国際協力の候補となる国が報告書に記載されている。

数枚で図を入れてこれまでの成果を記載

図の確認
図の説明追加



国際協力により2020年までの成果をレポートにまとめ、9月にATFレビューも開催された。

ATF Report 2020:

https://agenda.linearcollider.org/event/8626/attachments/35702/55436/ATF_Review_Report_2020_0831.pdf

ATF Review:

<https://agenda.linearcollider.org/event/8626/>

ATF Review 2020

29 Sep 2020, 19:30 → 30 Sep 2020, 00:00 Asia/Tokyo

- Charge 1: Evaluate the scientific results at ATF/ATF-2
- Charge 2: Evaluate future ATF operation for LC R&Ds
- Charge 3: Evaluate future ATF operation (other than LC)

Masahiro Katoh Hiroshima U.
Katsunobu Oide (chair) KEK/CERN
Tatiana Pieloni EPFL
Vladimir Shiltsev FNAL
Zhentang Zhao SARI

3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (ビームダンプ)

有識者会議・学会議の指摘

- 特に、ビームダンプについては、衝突エネルギーが**500GeV**から**250GeV**になったことで、設計の尤度は増加したものの、ハイパワーのビームを定常的かつ高い信頼性をもって受け続けられる窓の耐久性や窓の定期的な交換作業技術、耐震性能等を含め、本準備期間においてダンプシステムとして技術を完成させる必要がある。(有識者会議 p.42)
- 窓材の健全性モニタリング、遠隔操作による交換作業システムの具体的設計、高エネルギービームと水との反応で起こる事象の詳細については、準備期間に十分な検討が進められなければならない。(学会議 p.7)

2018年以降の取り組み

例

ILCのビームダンプはSLACの2.2MW水ダンプをもとにSLACを中心とする海外研究者が中心となって設計が行われた。2017年以降、KEKの研究者がILCビームダンプの設計再確認に取り組むとともに、J-PARCのターゲットシステム、JLABの水ダンプ、CERNのLHCビームダンプを調査し、さらにこれらのシステムの設計担当者とも議論を重ねて、ビームダンプ窓の最適化を行った。また、遠隔システム窓交換システムについても、上記のシステムを調査しAAAの産業部会?とも連携して設計を進めた。

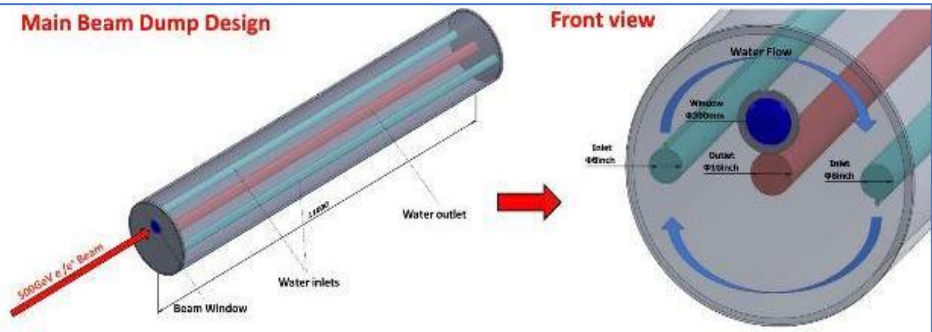
次は主要部品(ビーム窓等)のプロトタイプ作成と実際のダンプシステムの詳細技術設計作業を行う段階である。

2019年10月にKEKの国際WGにより技術課題への対応が議論され、取り組みと国際協力の候補となる国が報告書に記載されている。

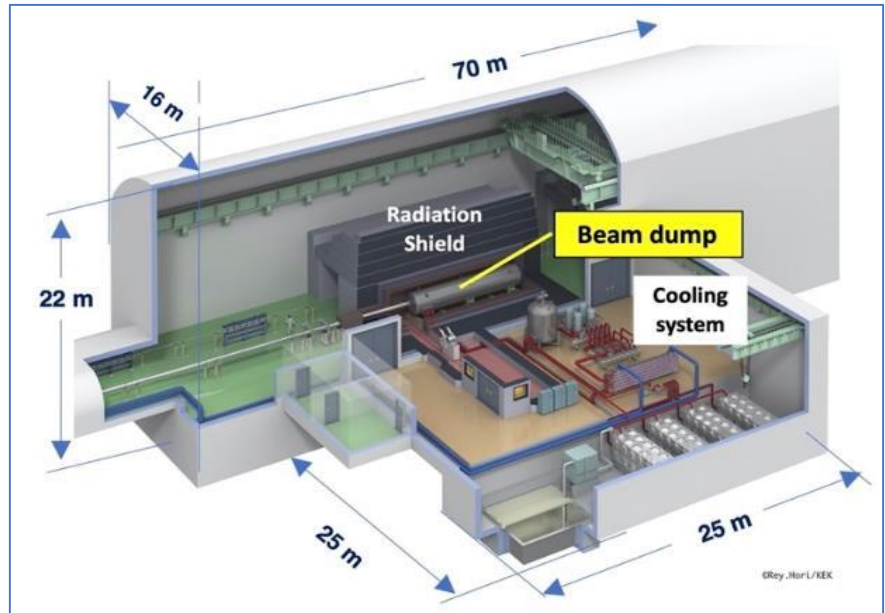
準備期間に国際協力で課題を解決するよう、IDTで検討を行っている。

できることは
れ以上に進む

図の確認
図の説明追加



- 【Base Design】**
- **Water power absorber** and **forced convection** to extract the heat.
 - * Water is compressed **1 MPa** \Rightarrow **boiling temp 180°C**
 - * Vortex water flow \Rightarrow Mass flow rate : **104.5kg/s** each inlet, Ave flow velocity **2.17m/s**
 - Beam Window made of **Ti-6Al-4V**.
Beam sweep : 1kHz sweep, sweep radius : **6cm**



ILC国際ワーキンググループ報告書

クラウド・デッシュ	独ボン大学 教授
アンドリュー・ランクフォード	米カリフォルニア大学アーバイン校 教授
カジャリ・マズムダー	印タタ基礎物理学研究所 教授
パトリシア・マクブライド	米フェルミ国立加速器研究所 主任研究員
道園 真一郎	KEK加速器研究施設 教授
岡田 安弘	KEK理事 (委員長)
クロード・ヴァレ	仏フランス国立科学研究センター (IN2P3) 主任研究員



このワーキンググループは、**建設経費、運転経費の国際分担**についての考え方、ILCを実現するための**組織の在り方、技術的準備に取り組むための国際協力**について検討を行うために設置された。

文部科学省の国際リニアコライダー(ILC)に関する**有識者会議及び日本学術会議所見**で指摘された**技術的課題**に関して、技術準備計画を示し、国際協力を進めるべき必要な技術課題と国際協力先の候補がまとめられている。



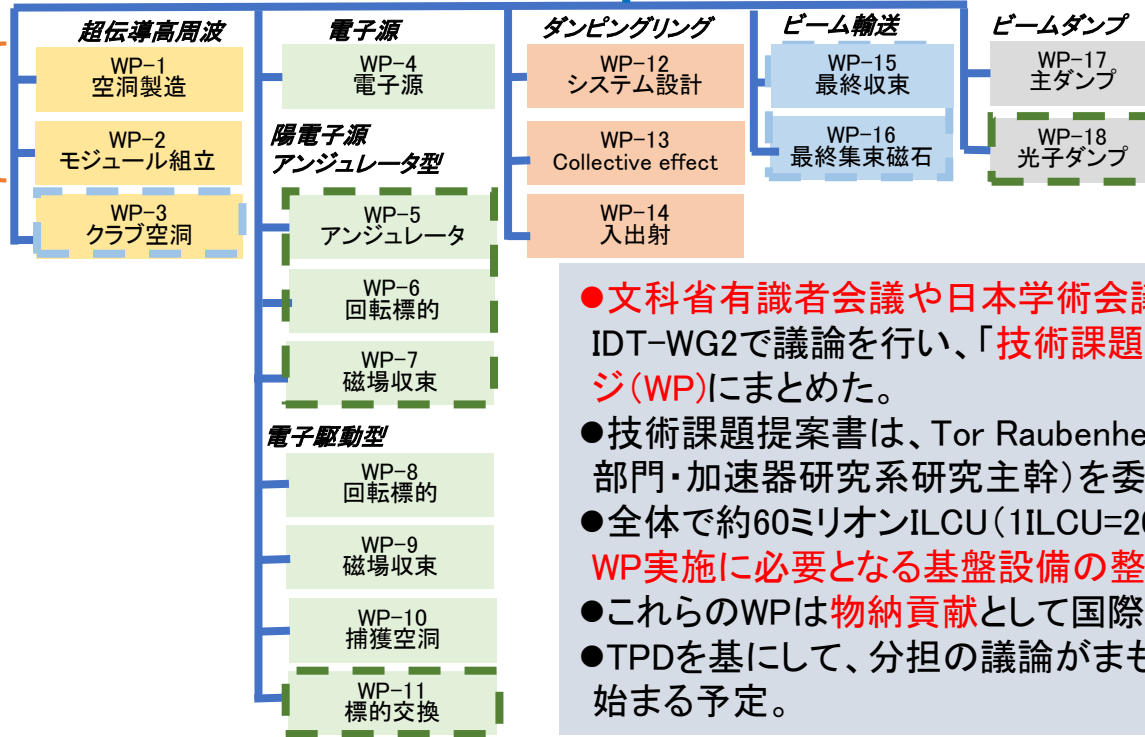
ILC国際ワーキンググループ報告書の提言より
<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2019/10/02/1000/>
 これを基に、IDT-WG2で検討を進めた。

Component	Issue	Summary of tasks	Candidates for collaboration
超伝導空洞 SCRF Cavity	Mass production incl. automation	Performance statistics, mass production technology	France, Germany, US
	Cryomodule transport	Performance assurance after transport	France, Germany, US
陽電子源 Positron Source	Rotating target	Exchanging target, system design	CERN, France, Germany, US + industry-academia efforts
	Magnetic focusing system	System design	France, Germany, Russia, US
ダンピングリング Damping Ring	Photon dump ²³	System design	CERN, Germany, US
	Fast kicker	Test of long-term stability, system design	CERN, Italy
衝突点 Interaction Region	Feedback	Test at SuperKEKB	Italy
	Beam focus/position control	Test of long-term stability	CERN, UK
ビームダンプ Beam Dump	Total system	System design	CERN, US
	Beam window, cooling water circulation	Durability, exchangeability, earthquake-resistance	CERN, US + industry-academia effort

技術課題に関する取り組み

ILC 準備研究所

実際の空洞・モジュール製造



これらのワークパッケージや詳細技術設計への取り組みを通じてILC建設期間および運転期間に中核となる人材を育成する。

- 文科省有識者会議や日本学術会議で指摘された技術的課題などについてIDT-WG2で議論を行い、「技術課題提案書」(TPD)として18のワークパッケージ(WP)にまとめた。
- 技術課題提案書は、Tor Raubenheimer氏 (SLAC国立加速器研究所、加速器部門・加速器研究系研究主幹)を委員長とするレビュー委員会で審議された。
- 全体で約60ミリオンILCU (1ILCU=2012年の1ドル)、360人・年程度(ここには、WP実施に必要なとなる基盤設備の整備費用は含まれていない。)
- これらのWPは物納貢献として国際的に分担される。
- TPDを基にして、分担の議論がまもなく各極(アメリカ、ヨーロッパ、アジア)で始まる予定。

WP-1:高性能空洞の大量生産

- 各40台の空洞を3極で製造(合計120台)
- 高性能空洞の歩留まりを評価



日本では、空洞評価設備やモジュール評価設備のような基盤設備の整備が別途必要。

WP-2:クライオモジュール組立・移送

- クライオモジュール各2台を3極で製造する(合計6台)
- クライオモジュールが海上移送による性能劣化がないこと、モジュールが規格通りとなっているかを確認



クライオモジュール



陸上移送の例

WP-15:KEKのATFを活用した最終収束評価

- ILC衝突頻度を最大化する最終収束系の最適化
- KEKのATFへの各国からの物納貢献により実現

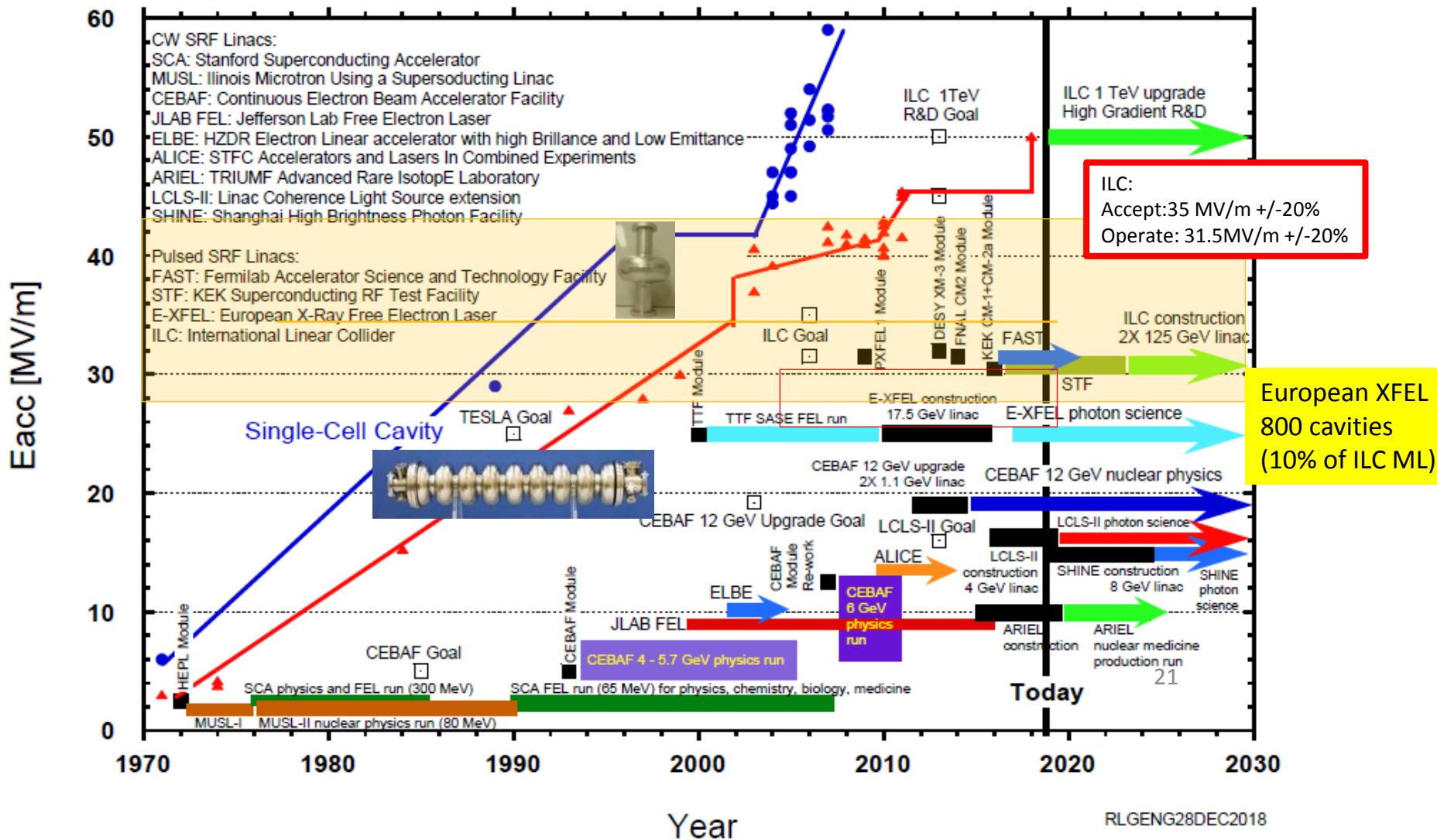


Matured SRF technologies

R. Geng (ORNL)

L-band SRF Linear Accelerator Technology

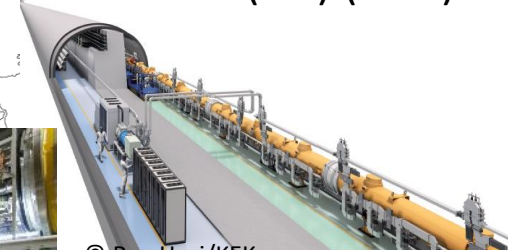
Impact to Nuclear, Elementary Particle, and Photon Sciences and Medical Applications



Worldwide large scale SRF accelerators



International Linear Collider (ILC) (Plan)



© Rey.Hori/KEK

ILC
 -900 cyromodules
 -8,000 cavities
 -250 GeV (Pulsed)

Euro-XFEL

Operation started from 2017

-100 cyromodules
 -800 cavities
 -17.5 GeV (Pulsed)



DESY

LAL/Sacray

INFN

KEK

SINAP

SHINE (under construction)

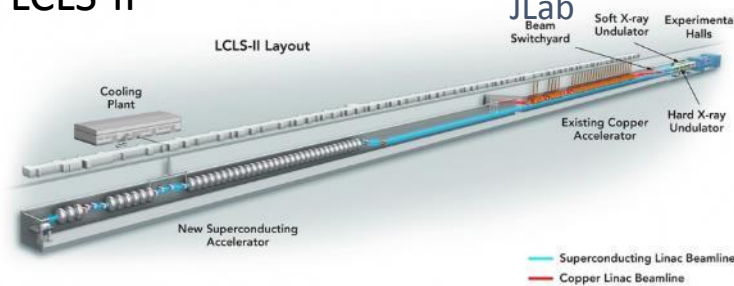
-75 cyromodules
 -~600 cavities
 - 8 GeV (CW)



LCLS-II + HE (under construction)

-35 + 20 cyromodules
 -280 + 160 cavities
 - 4 + 4 GeV (CW)

LCLS-II



SLAC

FNAL

Cornell

JLab

Superconducting Linac Beamline
 Copper Linac Beamline



1.3GHz 9 cell cavity

超伝導加速器のコスト削減R&D



- 100 Cryomodules
- 800 SC Cavities
- 17.5 GeV (Pulsed)
- 2017から稼働

● DESY

● LAL/Saclay

独：世界最大の超伝導高周波加速器・Euro-XFELの建設を通じて超伝導加速器システム全体のコストの削減に関する知見・経験を有する。この経験を基に空洞製造プロセスの効率化によるコスト削減を目指す。

仏：Euro-XFELにおいて、空洞のクライオモジュールへの組み込みを担当。組込作業の効率化および防塵に関する経験が深く、作業効率の向上と性能劣化防止に有効な組込作業の自動化に関する研究開発が可能。



超伝導加速器 コスト削減R&D の総合化

超伝導加速器の研究開発に経験の有る研究機関が各々の強み・経験を活かしながら協力してコスト削減に資するR&Dを総合的に実施

空洞単体の性能（加速電界、Q値）の向上

- ・空洞、クライオモジュールの製造数削減
- ・冷凍機の小型化

空洞製造プロセス、周辺機器のXFELでの経験

空洞プロセスの効率化によるコスト削減

空洞のクライオモジュールへの組込作業の自動化

自動化による人件費の削減
性能劣化防止（歩留向上）



- 35+20 Cryomodules
- 280+160 SC Cavities
- 4 +4 GeV (CW)
- 建設中

● SLAC

● FNAL

● Cornell大

● Jlab

米：LCLS-IIに導入する空洞で、窒素ドーピングと呼ばれる表面処理で性能を上げることに成功。空洞本体の「高電界・低損失」を目指す研究が盛んにおこなわれており、“窒素インフュージョン”、75度ベーキングなどの新たな空洞処理法が開発されてきた。空洞単体の高性能化に関する研究開発を先導している。

【実施内容】超伝導高周波技術を用いた加速器のコスト低減のための研究開発に基づく 性能評価・実装試験

- 超伝導高周波空洞は、加速器の主要な構成要素であることから、建設・運転コストの削減に向けて、特殊な表面処理や空洞の低価格化を図る。
- 素粒子・原子核物理探索の加速器や、物性研究用の自由電子レーザーなどで幅広く用いられている超伝導高周波技術は、加速器の性能において従来よりも効率的に粒子の加速を可能とする利点がある。



① 低損失・高電界実現のための 超伝導高周波空洞の表面処理

建設・運転コスト
の低減

- 空洞の熱処理を工夫する(75度ベーキング、窒素ドープなど)ことで、低損失・高電界を実現。冷凍機コストと空洞数の削減につながり、建設コストの低減に資する。
- また、加速効率が上がることにより、運転コストの低減にも資する。
- なお、75度ベーキングなどは開発されたばかりの技術であるため、米国や欧州との国際的な協力体制の下で、更なるパラメータ最適化に向けた研究開発を実施する。



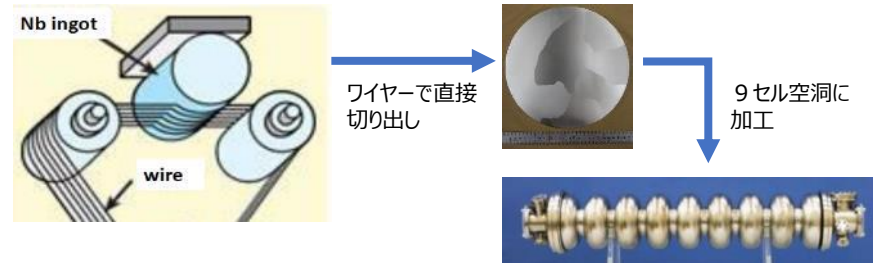
高温真空熱処理炉

空洞の真空高温熱処理などで空洞性能の向上がみられる。

② ニオブダイレクトスライス材の活用による 超伝導高周波空洞の低価格化

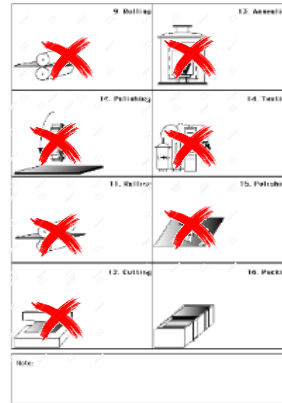
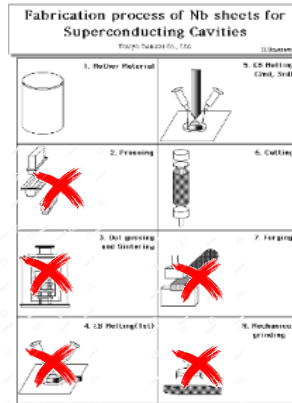
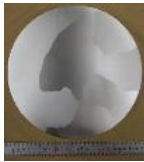
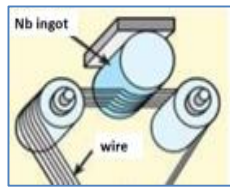
建設コスト
の低減

- 空洞の材料となる希少金属のニオブ板材料は、製造コストが高いことから、工程プロセスの簡略化によって、空洞の低価格化を図る。
- ニオブのインゴット(塊)からマルチ・ワイヤーソーを用いて直接スライスして切り出すことにより、従来工法での鍛造、圧延、機械研磨の各工程を省くことができ、コストの削減となる。



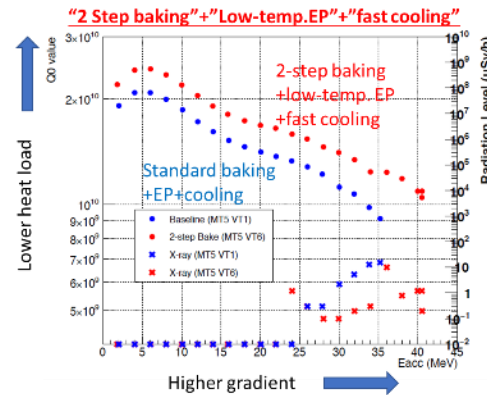
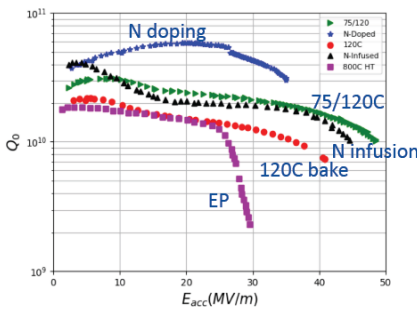
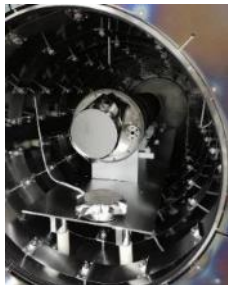
コスト削減R&D

(1) ダイレクトスライス材料



- 昨年度までにダイレクトスライス材で2台の空洞を製造。性能は32 および 34 MV/m (仕様: 35 MV/m).

(2) 高性能空洞のための表面処理



- N-Infusion処理を行った空洞をSTF-2加速器にインストール
- 75/120CやNdopingといった表面処理方法も評価を進めている。

1. ニオブダイレクトスライス材料の活用

- 2台の中純度LG（ラージグレイン）-Nb材9セル空洞の性能評価

⇒ E_{acc} は 34/32 MV/mと改善したが ILC仕様は未達

- 高純度LG-Nb材によりセル部の材料費を50%低減

⇒ 3セル空洞4台を製作中

- 室温・低温引張試験および3セル空洞破壊実験

⇒ 世界標準であるTESLA型の空洞形状において、高圧ガス保安法準拠を達成できる。

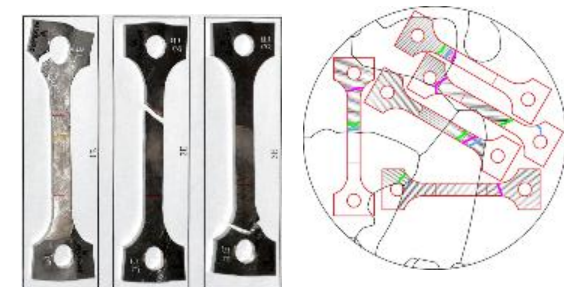
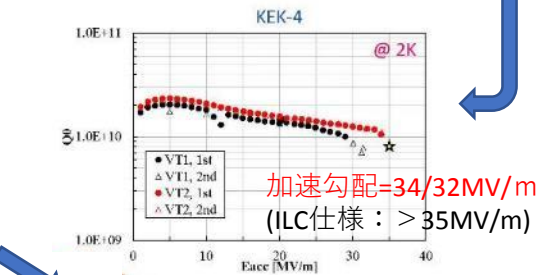
来年度製作予定の高純度LG-Nb材による9セル空洞の製作技術の蓄積を行った。



ダイレクトスライス中純度LG-Nbで製造したKEK-4/5号機



低温引張試験機
(超伝導低温工学センターと共同開発)



3. 加速器での性能評価

冷凍機運転業務

2020/8月24日～9月16日

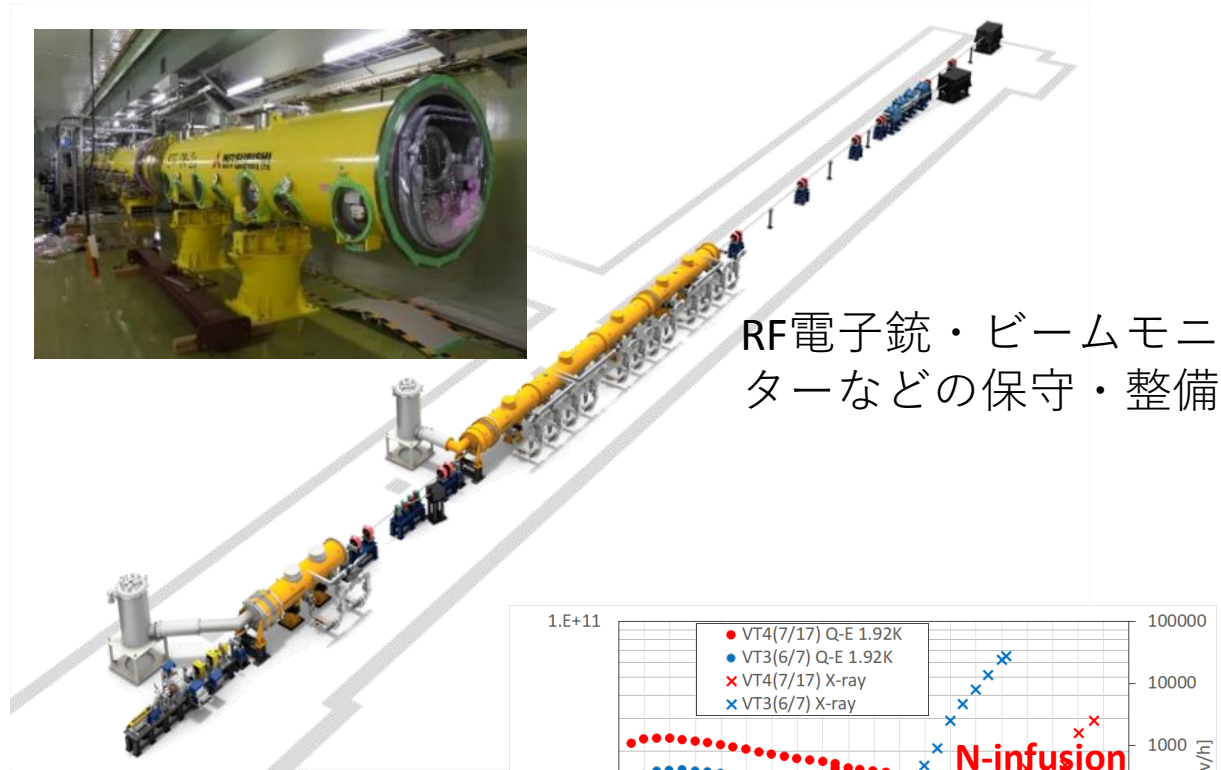
2021年2月8日～3月31日



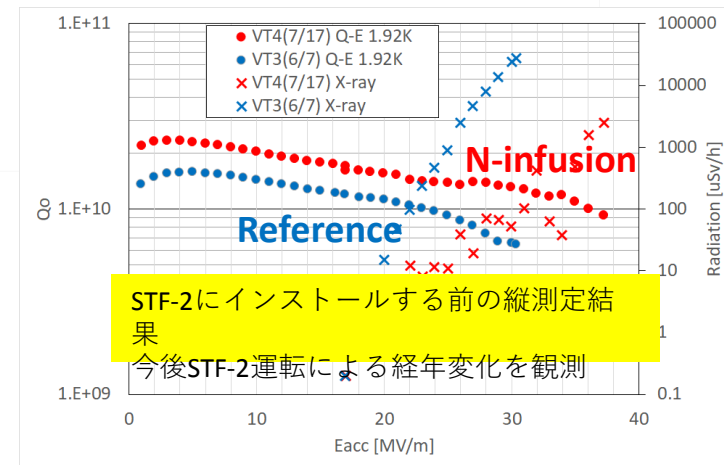
回収圧縮機の開放検査
(法定検査)



12空洞運転のためのRF系の構築・運転準備

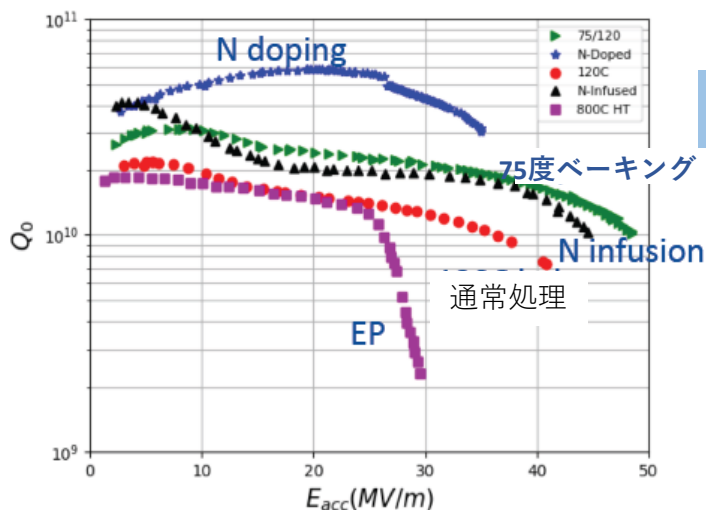
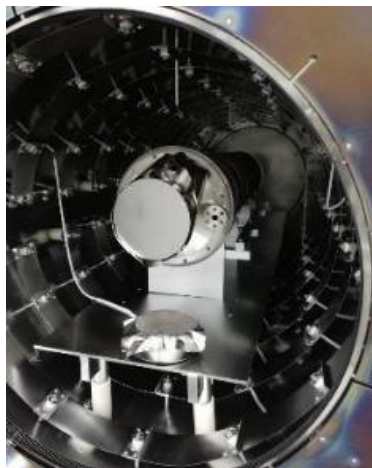


RF電子銃・ビームモニターなどの保守・整備

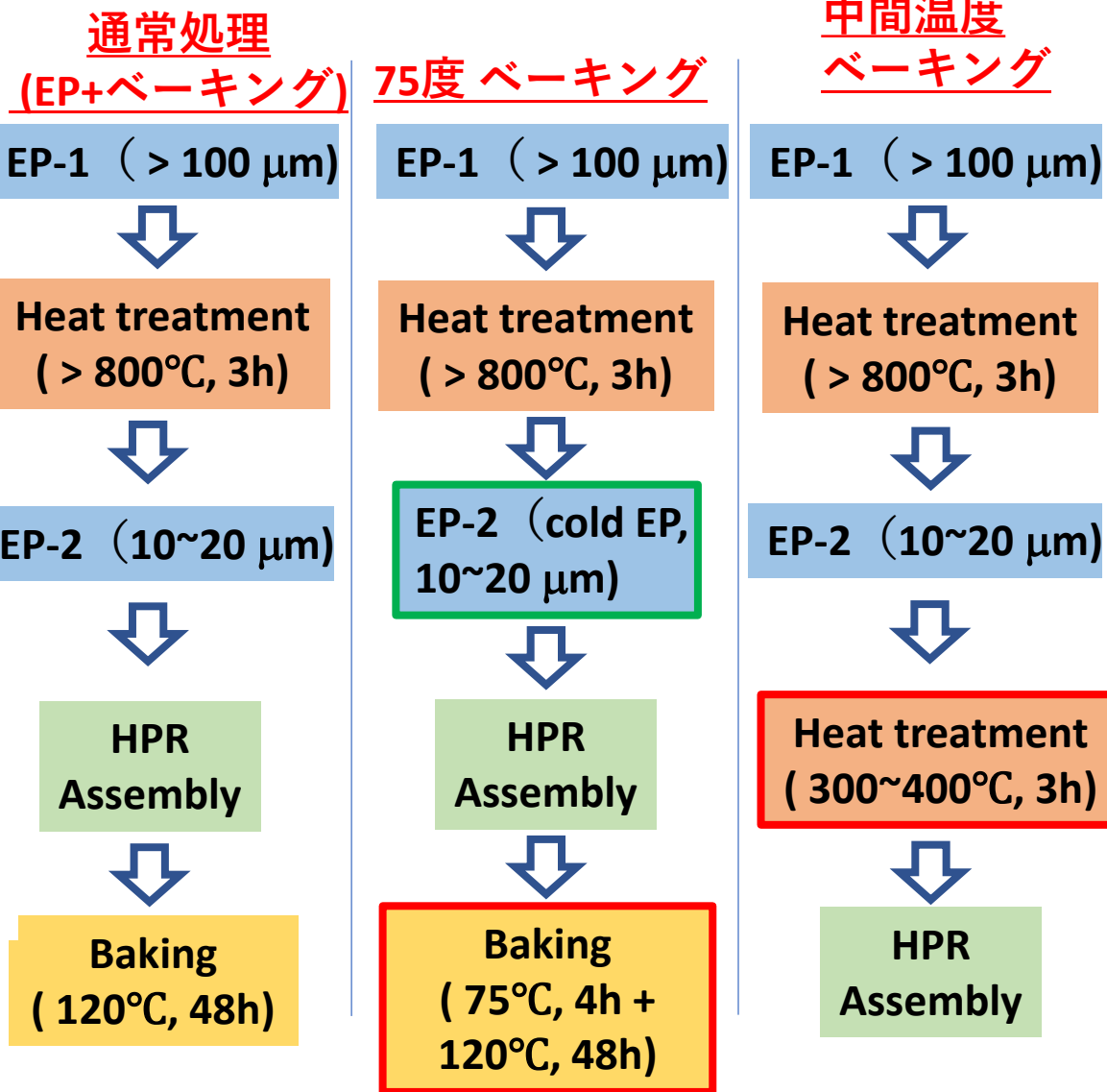


窒素インフュージョンを使った空洞をインストールしたSTF-2の運転を開始
(3月後半からビーム試験)

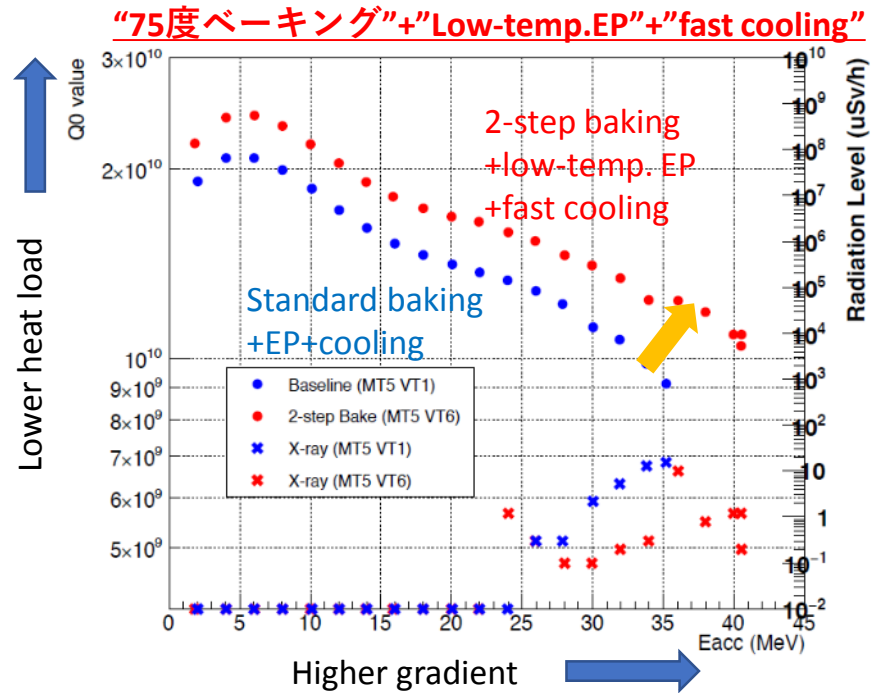
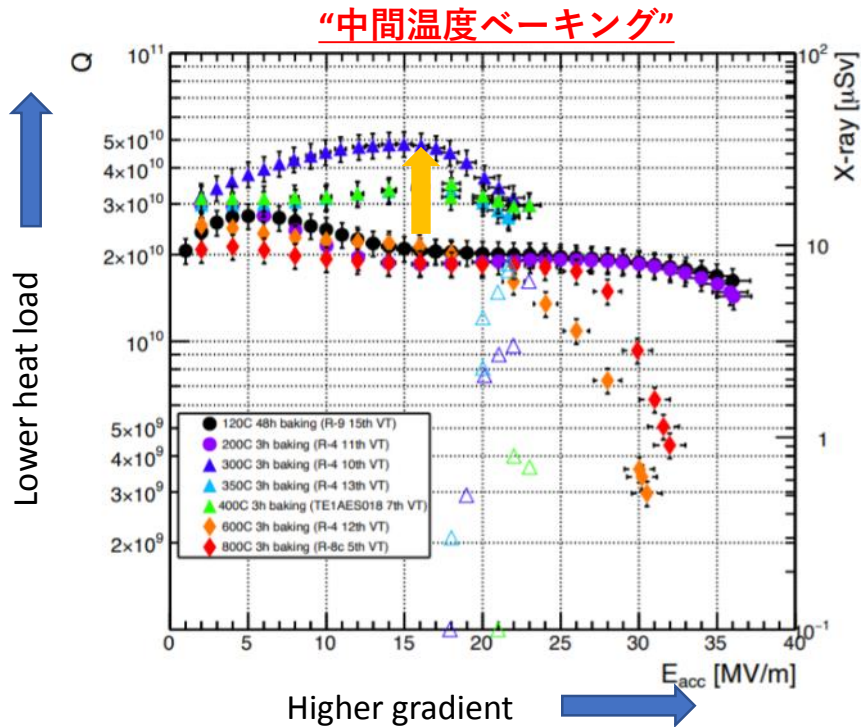
超伝導空洞の表面処理工程比較



EP: 電解研磨
 HPR: 高圧超純水洗浄
 Heat treatment: 真空炉で実施
 Baking: 空洞外部を直接温める



低損失・高電界処理



- 真空炉で熱処理 ⇒ HPR ⇒ 組立て ⇒ 縦測定
- 真空炉での熱処理温度を変えることで、空洞の振る舞いが大きく変わる
- 300～400度の熱処理で大幅にQ値が上昇
- 酸化膜を分布を変えている影響か。
- 高いQ値と加速勾配を得る条件を探る

- 75度ベーキングと、低温電解研磨および急速冷却を組み合わせることで、40 MV/m以上の高電界で高いQ値が得られた。
- 「低温電解研磨」と「急速冷却」はFNALでの標準手法。
- 再現性確認が必要。

量産時の歩留まり (90%)
を確保できるか？

準備研究所期間に120個の
空洞を製造。歩留まり確認。

High Gradient Cryomodule (HGC)

- Present ILC spec 31.5 MV/m (per TDR)
- Many new advances in SRF technology since ILC TDR. **New treatments may enable significant reduction** in ILC cost: flux expulsion, 75/120 two-step bake C, cold EP (processing sequence stays similar)
- Supported by ILC Cost Reduction R&D funds from DOE, Fermilab plans to assemble a cryomodule with cavities with new treatments.
- Goal is to reach higher gradient than has ever been demonstrated in CM test
- Aim will be 38 MV/m average gradient with $Q_0 > 1.0 \times 10^{10}$ and a stretch goal of 40 MV/m
- Achieving this would be a key demonstration of the potential for cost reduction for ILC
- Will reuse CM1, the first SRF cryomodule assembled at Fermilab in 2007 – as a part of a collaboration between Fermilab, DESY, and LASA



KEKで表面処理した空洞の組込を検討中

High Gradient Cryomodule (HGC)

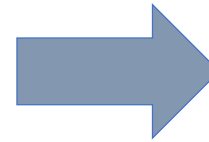
- Encouraging international participation in HGC. Contributions under discussion:
 - Cavities, cavity performance R&D, advanced cleanroom assembly techniques, magnetic shielding, cryomodule testing, and more
- Labs involved to date:



日仏・日独協力(2020ー)

(日仏)

- 空洞の組込作業効率の向上と性能劣化防止に有効な「防塵作業の自動化」に関する研究開発。
- 導入により、コスト削減や埃の削減(性能劣化の抑制)が可能となる。
- 将来的に組込み作業全体の自動化につながる。



Dust removal by human to by robot

@Saclay ISO4 Clean Room

(日独)

- ニオブ材を用いた空洞単体の製造・表面処理・性能評価の「空洞プロセス」の効率化に関する研究開発。
- 製造時のコスト削減につながり、加速器製造プロセス全体の省力化となる。



Automatic rf measurement system (@DESY)



Cavity handling tool (@DESY)

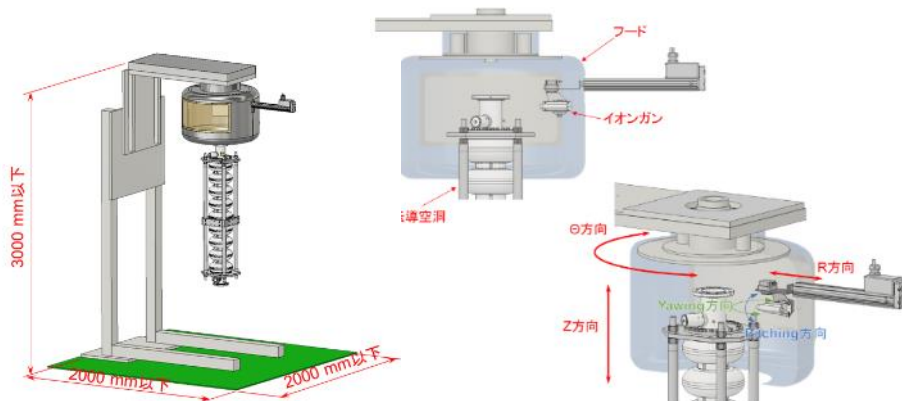


4. 防塵作業の自動化（仏）

5. 空洞製造の効率化（独）（2020年度）

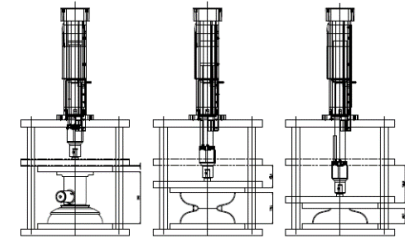
（防塵のための）超伝導空洞自動クリーニングシステム（日仏）

- 空洞接続や真空部品を組み立てる前に、空洞の外側やネジ穴のイオン化エアガンによる洗浄は必須だが、長時間作業。
- 解決策の一つとして、自動防塵作業（自動クリーニング）システムを開発した。
- フランスのIRFU/CEAはすでにESSプロジェクトで自動洗浄システムを使用しており、IRFU/CEAと共同研究。
- 余分な埃の混入を防ぐために空洞の端部を覆い、発生した埃をクリーナーで除去。
- 3月末納入・動作確認予定。来年度、稼働・ソフト改良。



セル周波数測定装置の開発（日独）

- ハーフセル、ダンベルの周波数測定装置の開発
- 空洞製造工程における品質確保に貢献



電気特性評価のための内面自動判別装置

- 空洞内面検査画像からの自動欠陥判別装置の開発
- 必要に応じて随時判別アルゴリズムをアップデートしていく。



小型冷凍機

- 超伝導材料(Nb等)の低温電気特性評価用
- 冷凍機ユニット：SHI RDE-418D4
- 圧縮機ユニット：CSA-71A



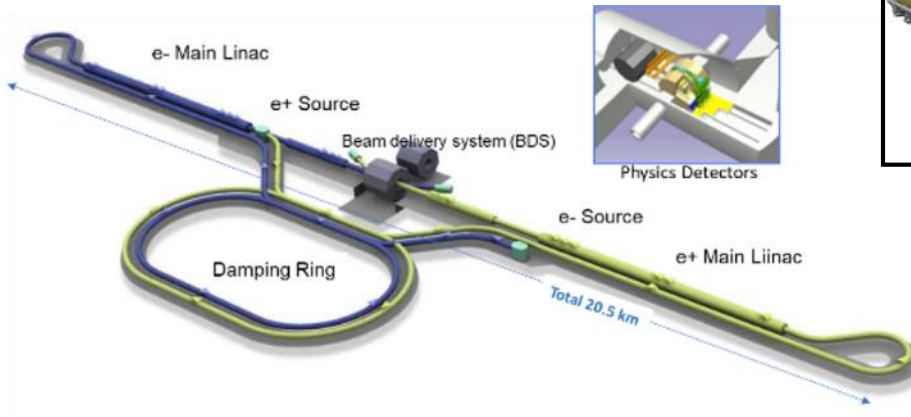
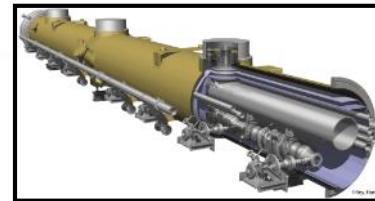
ILCでの超伝導加速技術

- 約10 kmの直線加速器 (MLs)
- 約900個のクライオモジュールに空洞が8~9個
- 空洞はEuroXFELなどと同タイプの1.3GHz9セル空洞
- 約9000個の空洞が製造され、このうちの約8000個を使用
- 衝突点付近にはクラブ空洞

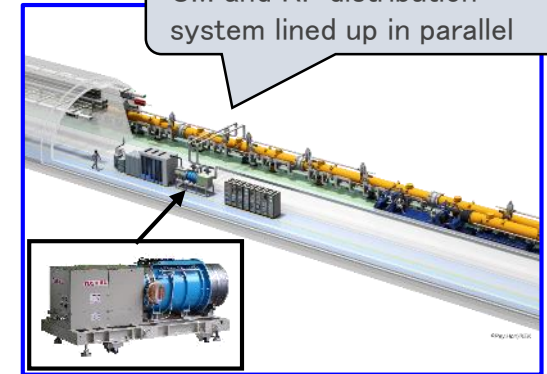
8000 out of 9000 cavities to be used



900 CMs to be used



CM and RF distribution system lined up in parallel



WP-1: 空洞量産実証

- ◆ ILCでの超伝導空洞量産に先立って世界で120空洞の製造
 - ◆ ~1% of full production
 - ◆ 40 cavities for each region
- ◆ **TDR以降の費用対効果の高い製造方法**
- ◆ プラグ互換性の確認
- ◆ 表面処理方法の基準を再構築
- ◆ 空洞性能・歩留まりの評価
- ◆ 日本の高圧ガス保安法を満たす製造方法を確立

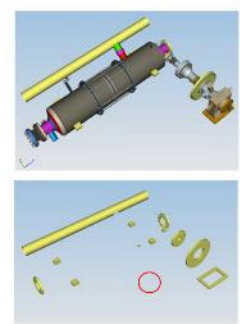
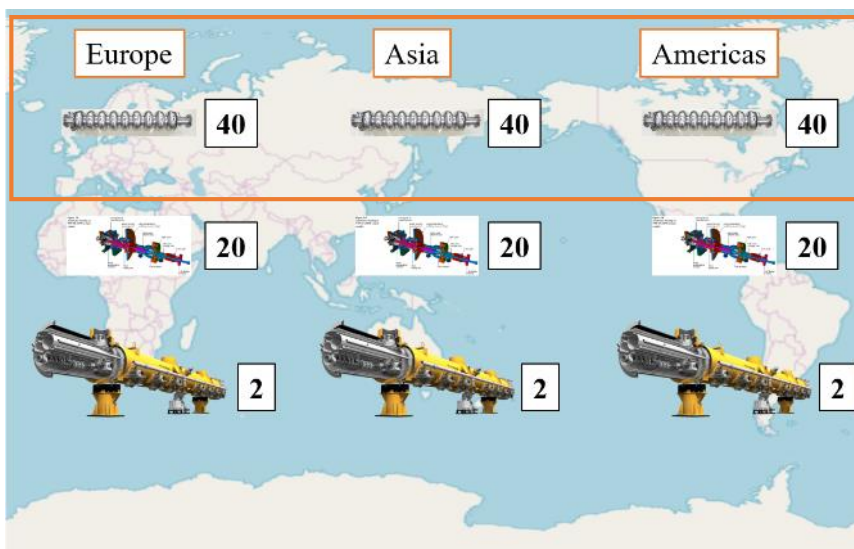
Yuriy Pischalnikov (FNAL)

Tuner that satisfied all specs for ILC already exist ...
FNAL designed LCLS II TUNER



- ✓ Compact double-lever Tuner that fit on the "short-shaft" cavity
- ✓ Robust/Low cost tuner frame design.
- ✓ High tuner stiffness for minimization of LFD
- ✓ Tuner design allow to replace actuators (stepper & piezo) through designated CM port without tuner dis-assembly
- ✓ Slow tuner range more than 9000 Hz
- ✓ Encapsulated piezo actuators translated stroke directly to the cavity (piezo stroke >2.5kHz and low group delay— important for active LFD compensation)
- ✓ More than 300 tuners that built and employed at 40 LCLS II have been cold tested/qualified for LIIAC operations

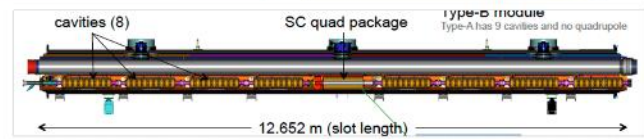
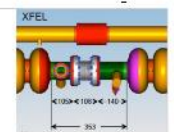
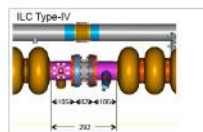
Fermilab



Item	TDR Baseline
Cavity shape	TESLA
Length	Fixed, L = 1,247 mm (61 mm shorter than XFEL)
Beam pipe flange	Fixed
Suspension pitch	Fixed
Tuner	Blade
Coupler flange (cold end)	40 mm
Coupler pitch	Fixed
He -in-line joint	Fixed

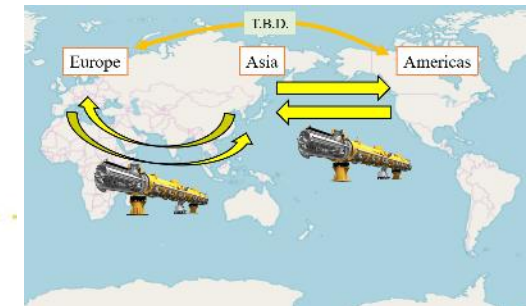
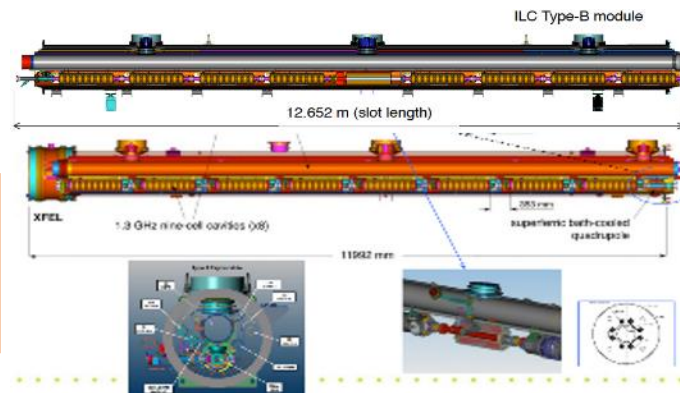
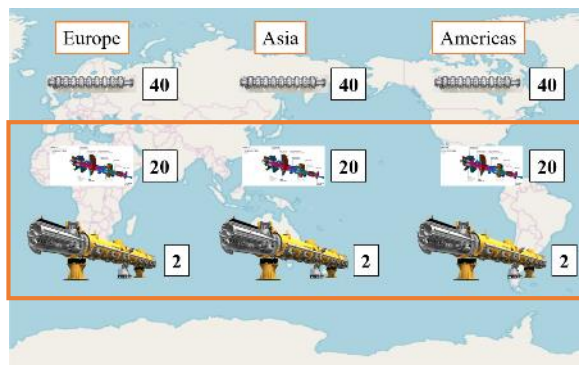
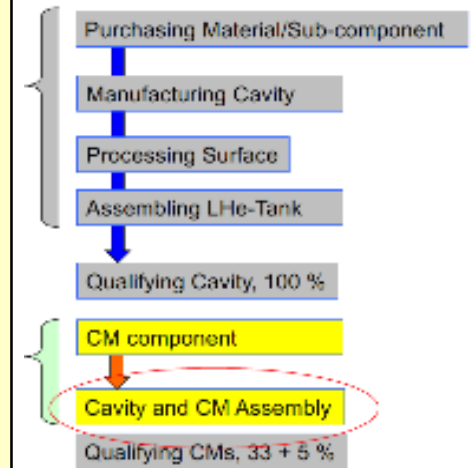
Process	Standard Fabrication/Process
Fabrication	No-sheet purchasing
	Component Fabrication
	Cavity manufacturing with EBW
Process	EP-1 (~150um)
	Twice allowed
	Ultrasonic degreasing with detergent, or ethanol rinse
	High-pressure pure-water rinsing
	Hydrogen degassing at > 600 C
	Field flatness tuning
	EP-2 (~20um)
	Ultrasonic degreasing or ethanol (or EP 5 um with fresh acid)
	High-pressure pure-water rinsing (HPR)
	Antenna Assembly
	Baking at 120 C
Cold Test (vertical test)	Performance Test with temperature and mode measurement

12/05/14 KEK-LC-Meeting




WP-2: クライオモジュール組立・移送

- ◆各領域で2台のクライオモジュールを製造
- ◆WP-1で製造された空洞のうち48空洞を実装
- ◆日本の高圧ガス保安法に準拠
- ◆関連部品（入力カップラー、チューナー、超伝導磁石など）も製造
- ◆クライオモジュールの海上移送は初めての実証
 - ◆アメリカ・ヨーロッパから1つのクライオモジュールを移送
 - ◆日本で性能を確認
 - ◆専用のショックダンパなどを用意

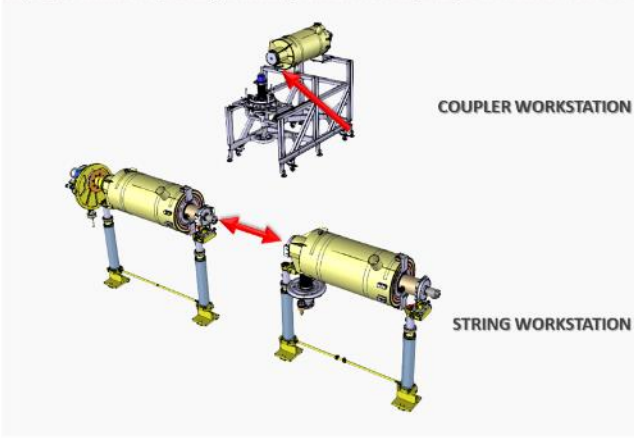


クライオモジュール組立

- 超伝導高周波加速器のクライオモジュール組立システムの技術は成熟。
- 欧州のXFEL加速器システムは2017年から稼働しており、米国のLCLS-II / LCLS-II-HEが現在建設中である。
- さらに新しい自動組立技術や、クライオモジュールの性能劣化を抑える技術などが開発されてきている。

cea tech  Framework of the project

The project consists in providing a cleaning solution for cavity flanges in cleanroom ISO4 for workstations COUPLER and STRING



COUPLER WORKSTATION

STRING WORKSTATION

Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives

Stéphane BERRY

25 octobre 2020

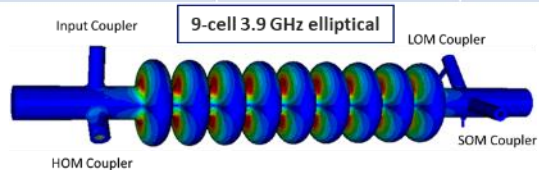
3



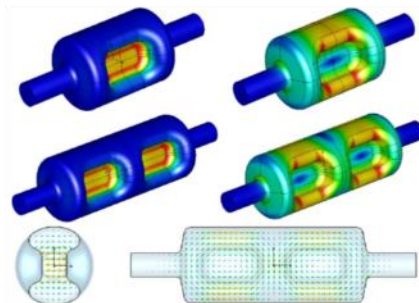
WP-3: クラブ空洞

- **衝突点上流14m**の場所に、電子側、陽電子側にそれぞれ2個セットのクラブ空洞が設置される。
- 狭いスペース、電子側と陽電子側の**高精度の同期**が必要。
- 2013年のILC TDR以降、DQW (EIC, HL-LHC), 楕円空洞 (ILC RDR and TDR), RFD (EIC, HL-LHC, その他のプロジェクト), QMiR (SPX), WOW (EIC) などがこれまで開発
- 2空洞を試作し性能を評価

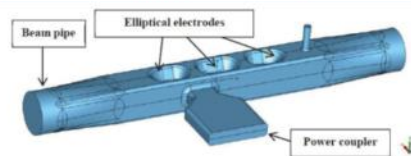
	Elliptical (TDR)	RFD (1/2-cell)*	DQW (LHC/EIC)*	WOW (EIC)*	QMiR*
Frequency (GHz)	3.9	1.3	1.3	1.3	2.6
Vt (MV) – per cell	0.3	1	1.2	1.3	0.7
Ep (MV/m)	17	39/40	41/51	50	54
Bp (mT)	73	79/77	80/80	80	75
	ULAN	ODU/JLab	BNL	BNL/SLAC	FNAL/ANL



1.3 GHz RF Dipole cavity



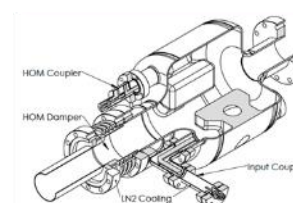
Quasi-waveguide Multicell deflecting Resonator



Double Quarte Wave cavity



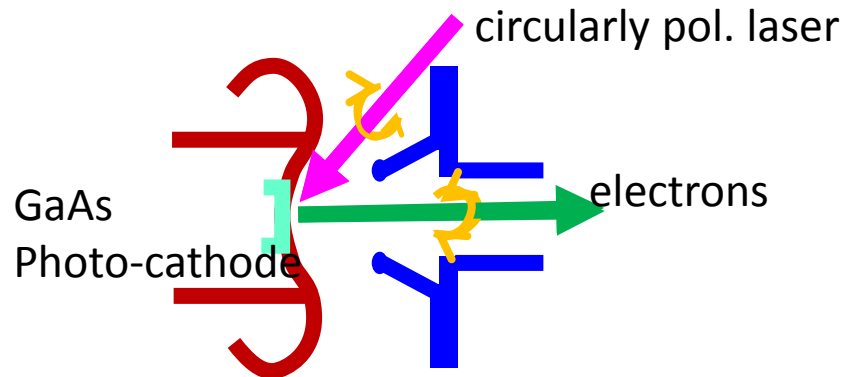
SRF deflecting cavity for ARIEL



電子源

- 主要部品は、駆動レーザーシステム、高電圧光陰極電子銃、光陰極。
- WP-4 電子源は、TDR以降の技術的な進捗を取り込む。
- 駆動レーザーシステムは、レーザー技術の進歩を考慮して再検討し、必要なビームパターンを実証するためのプロトタイプシステムを構築する。
- 他の加速器用に製作された近年の光陰極電子銃に取り入れられた技術を基に、より高い電圧を持つ光陰極電子銃を設計、試作する。(高電圧化によりレーザーのパルス長に対する要求が緩和され、光陰極の動作条件が改善される。)
- 近年の技術を基にした歪み超格子ガリウム砒素/ガリウム砒素リン化合物(GaAs/GaAsP)光陰極により、さらに高い量子効率と電子分極を実現する。
- 試作したレーザーシステムと光陰極電子銃を用いて、高バンチチャージ条件を検証。

偏極電子源



$$P \equiv \frac{N_L - N_R}{N_L + N_R} > 0.8$$

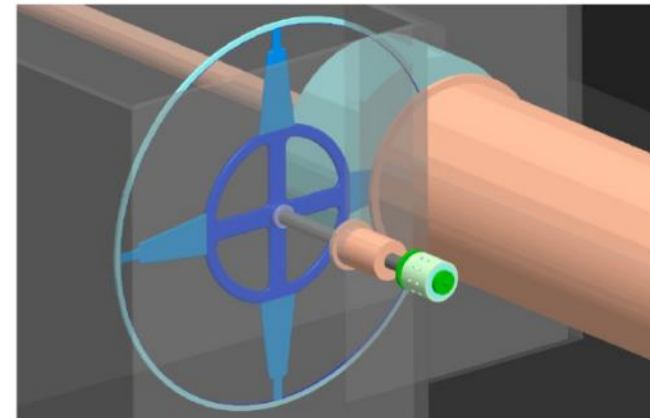
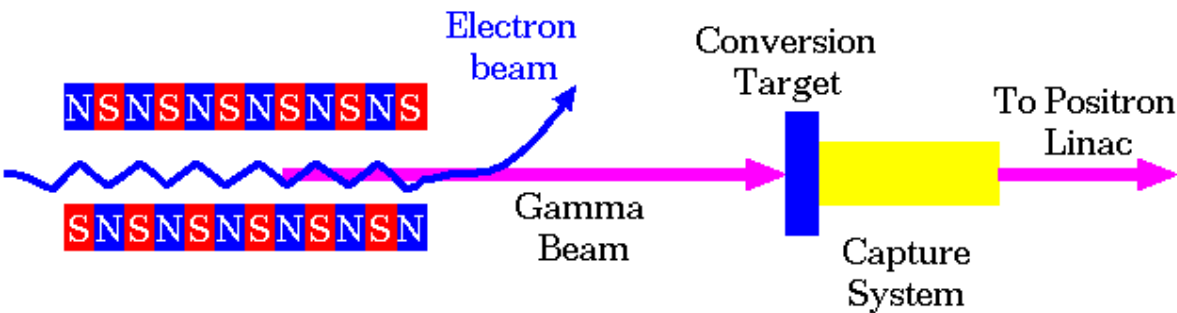
アンジュレータ型陽電子源

- 円偏光の光子を発生させるために、らせん状の磁場を作る(アンジュレータ)。
- 十分な強度の偏光光子を発生させるためには、230mの長さが必要。
- 偏光光子は、ターゲットに衝突して偏極陽電子を生成する。
- ターゲットは、強力な光子の熱負荷を処理するために回転し、冷却される。
- 生成された偏極陽電子は、磁気収束システムによって効率的に収集される。

WP-5 アンジュレータ: 過去のプロトタイプは十分な磁界強度を実現している。超伝導磁石への熱侵入を制限するマスク、磁場の誤差やアライメントの影響についてのシミュレーション研究および設計の最適化を実施する。

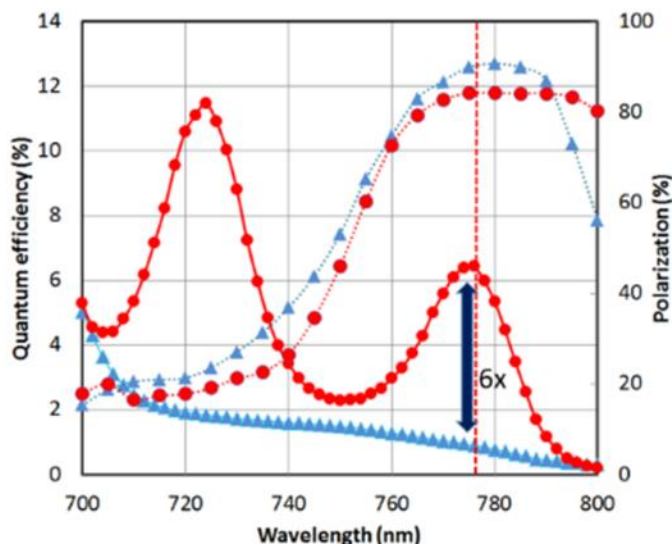
WP-6 回転標的: 放射冷却回転ターゲットの詳細技術設計を行う。回転ターゲットの磁気軸受を試作・試験。ターゲットについても試作・試験。

WP-7 磁場収束: 目標の陽電子収率を達成するために、パルスソレノイドを用いた改良型の設計、QWT(quarter wave transformer)等の代替設計も検討中。設計を最終化し、プロトタイプを製作して試験を実施。



WP-4: 偏極電子源

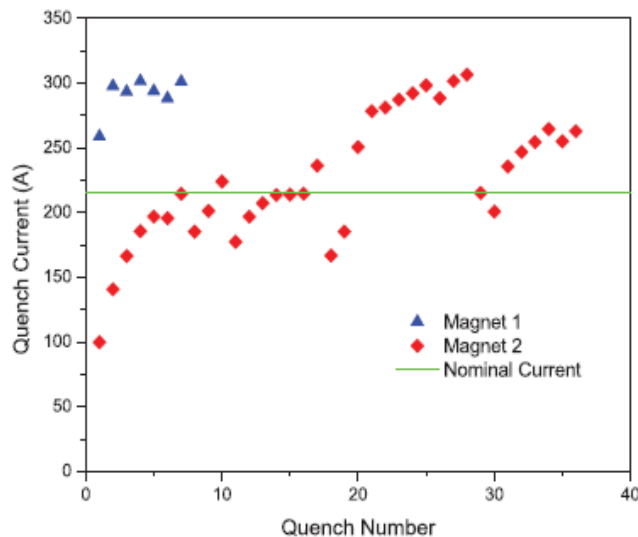
- 偏極電子源の基本設計には、**駆動レーザー**、**DC200kVの高電圧フォトガン**、**80%以上の偏極を実現するGaAs/GaAsP光電面**、電子入射器の設計要件が含まれている。
- ILC偏極電子源の構築に向けて、「ショーSTOPパー」はないが、GDE期間中にやり残した重要な技術課題が残っている。
- プロトタイプの**駆動レーザー**を完成させ、それを使って**高電圧銃からの歪んだ超格子GaAs/GaAsP光電面**の高バンチチャージ、高ピーク電流条件をテストすること
- GDE以降、レーザー、高圧ガン、光電面の技術的な改良が行われており、信頼性、性能、コストを改善するための機会として、設計に組み込む必要がある。



Parameter		TDR
Number Electrons per microbunch	N_e	3×10^{10}
Number of microbunches	n_b	1312
Width of microbunch	t_b	1 ns
Time between microbunches	Δt_b	556 ns
Microbunch rep rate	f_b	1.8 MHz
Width of macropulse	T_B	729 μ s
Macropulse repetition rate	F_B	5 (10) Hz
Charge per micropulse	C_b	4.8 nC
Charge per macropulse	C_B	6300 nC
Average current from gun ($C_B \times F_B$)	I_{ave}	31.5 (63) μA
Average current macropulse (C_B / T_B)	I_B	19.8 mA
Duty Factor in macropulse (1 ns / 556 ns)	DF	0.18 %
Peak current of micropulse (I_B / DF)	I_{peak}	11 A

WP-5 アンジュレータ

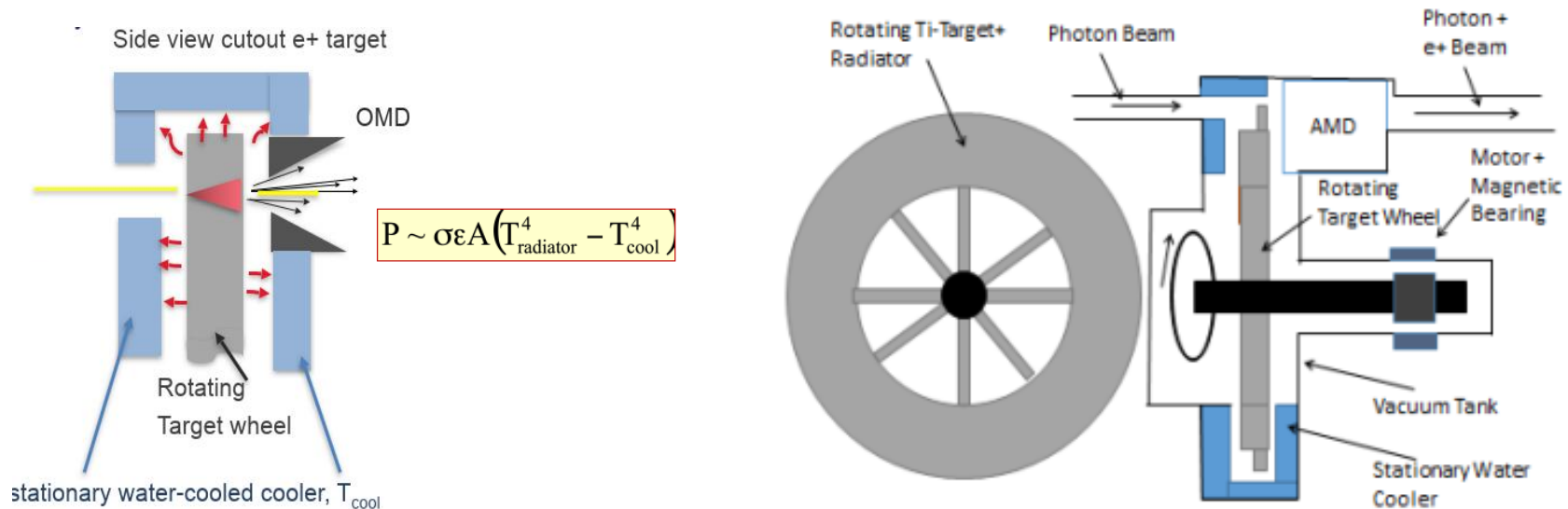
- 各アンジュレータのフィールド長は1.75mで、2台のアンジュレータを取り付け。
- 一組のプロトタイプアンジュレータは、**GDEの時代に十分な磁場強度**。
- WP-5での検討事項は、アライメント、マスキング、125GeVでの動作。
- アンジュレータの設計では、XFELなど他の施設で運用されている長尺アンジュレータのアライメントの経験を活かす。
- **アライメントのずれ、磁場強度エラーの影響**は、シミュレーションにより検討。
- マスキングは、ビームから放射される光子による過熱からアンジュレータを保護。
- マスキングの要件と設計についても、**詳細なシミュレーションを行って検討**。
- 駆動ビームエネルギーである125GeVにおける光子ビームを増強するため、**アンジュレータのパラメータをさらに最適化**するシミュレーションと技術研究を実施。



WP-6: アンジュレータ用回転ターゲット

- ILC250では、チタン合金 (Ti-6Al-4V) 製のターゲット (厚さ7mm)。
- ビームによる熱の発生は約2kW。
- ターゲットは直径1mで2,000rpmで回転し、冷却は放射冷却方式。
- 詳細な工学・製造研究についてはまだ行われていない。
- WP-6では、設計の最終段階からフルモデルの製造までを実施
- 既存の実験では放射冷却を使用したプロトタイプの場合がすでいくつかある*。

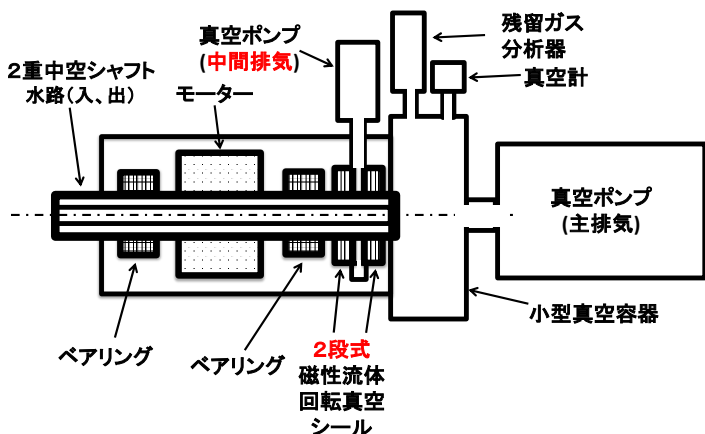
*静止したHeガスに浸されたCNGS (CERN) のグラファイトターゲットは、主に放射によって冷却され、自然対流によって補完されていた。また、FRIB-US、J-PARC、PSI、RAL-UKなどの実験でも、放射冷却されたターゲットの研究や使用が行われている。



電子駆動型陽電子源

ILCでは、アンジュレータ型と、従来型の電子駆動型の陽電子源が検討されている。
 アンジュレータ型には陽電子の偏極 (30%) が得られる特徴があるが、発生のためには125 GeVの電子が必要。
 電子駆動型は別電子加速器で陽電子を生成。これまでの経験が生かせること、陽電子生成のための高エネルギー電子が不要なことが利点である。

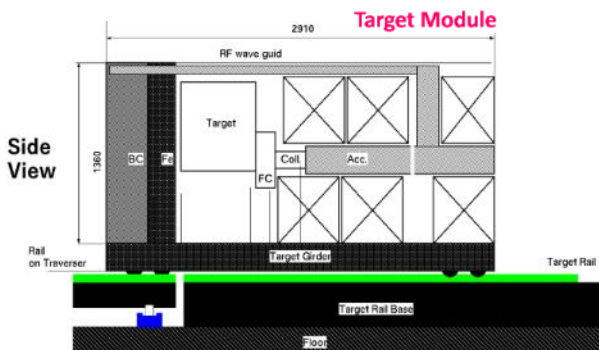
回転ターゲット用軸受(2段式)プロトタイプ



電子駆動型陽電子源の全体設計 (シミュレーションなどの机上検討)

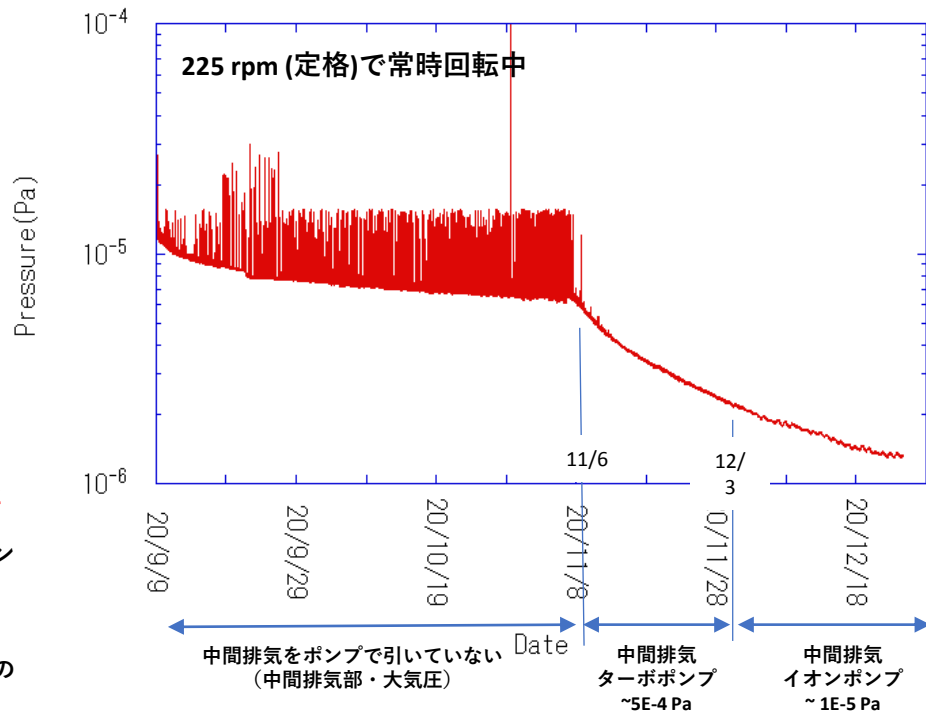
各種の机上検討を行った

- ・全体設計
- ・将来のUndulator導入を可能にするCFS設計
- ・キャプチャーシミュレーション - 広島大との共同研究
- ・放射線シミュレーション
- ・メンテナンススキーム検討
- ・キャプチャー部の加速管構造の検討・設計 - 広島大との共同研究



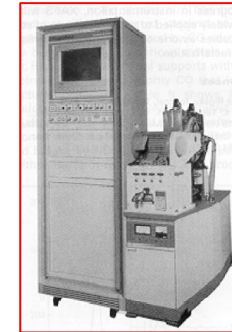
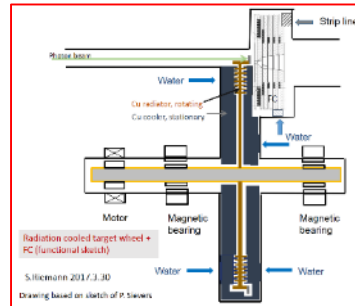
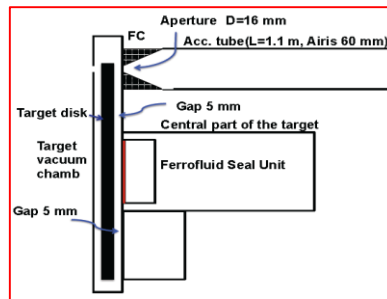
大気側から2段階で安定な超高真空を実現する中間排気付き回転シールにの長期・真空回転試験を行い、突発的な圧力上昇の完全抑止を確認した。

Double Seal



現在模擬ターゲットを付けた回転試験実施中

Positron rotating target



	undulator	E-Driven	Existing X-ray generator
Cooling/Seal	Radiation/ magnetic levitation	water/magnetic fluid	water/magnetic fluid
radius (m m)	500	250	160
weight (kg)	50*	65*	17
Tangential velocity (m/s)	100	5	160
rotation (rpm)	2,000	200	10,000
Beam heat load(kW)	2	20	90
Vacuum pressure (Pa)	10^{-6}	10^{-6}	10^{-4}

*The weight depends on the design of the disk part and the material

- Reliable rotating target
- Replacement of rotating target

Technical preparation at Pre-lab phase

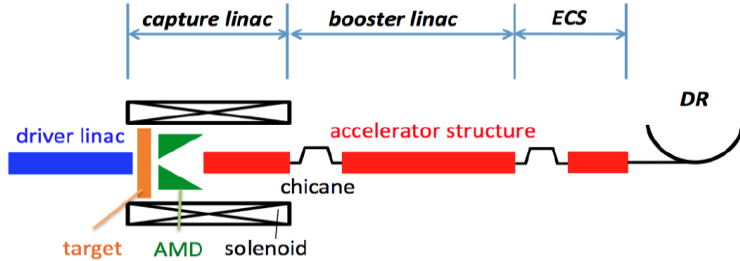
電子駆動陽電子源

- 電子駆動型陽電子源では、駆動用線形加速器で電子ビームを発生させ、回転ターゲットで(偏極していない)陽電子を発生させる。
- 陽電子は磁氣的に収束され、キャプチャーリニアック、電子を除去するシケイン、ブースターリニアック、陽電子ダンピングリングへと進む。

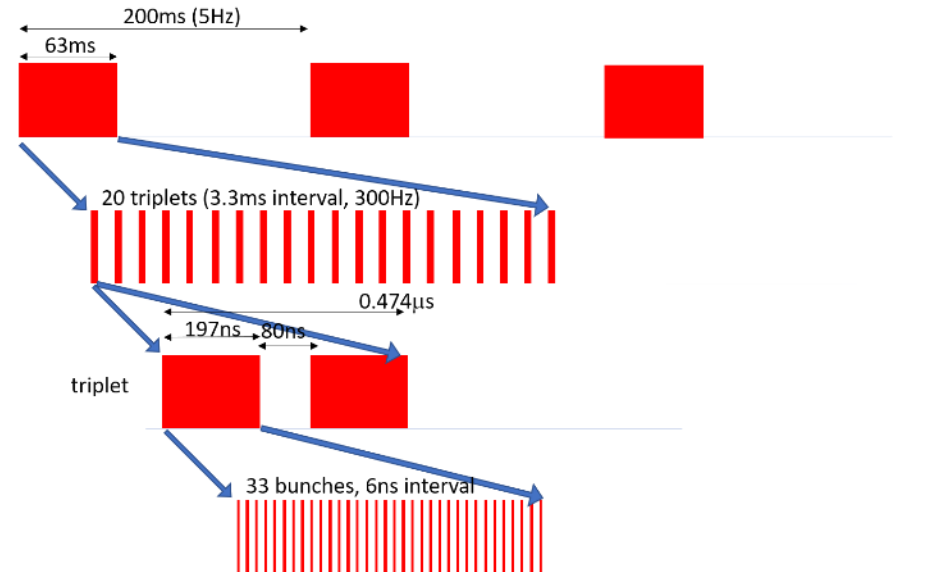
WP-8 回転ターゲット: ターゲット応力・疲労評価、真空シール寿命確認、モジュール試作

WP-9 磁気収束システム: 磁気収束導体の電気・熱・機械的特性シミュレーション、電源・伝送ライン設計、システム試作・試験

WP-10 (キャプチャーリニアックの)捕獲空洞: 部品設計と試作、ビーム負荷補償と調整方法の検討

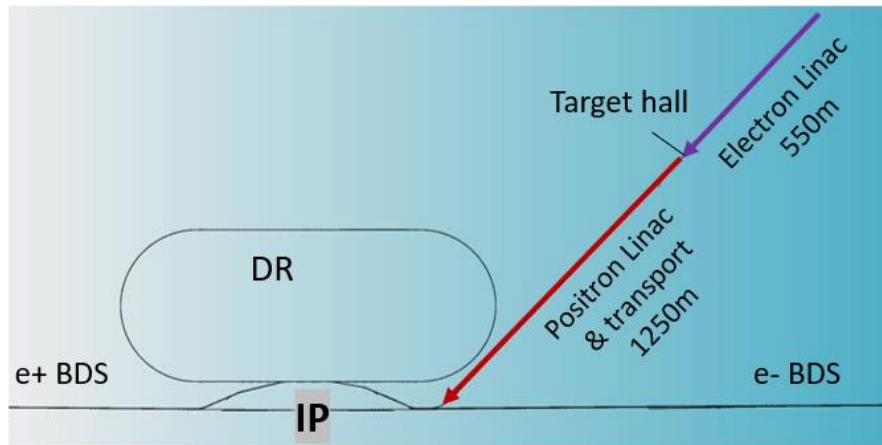


Parameter	Value	Unit
Drive beam energy	3.0	GeV
Bunch charge	4.0	nC
N of bunches in a pulse	66	bunches
Bunch spacing in a pulse	6.15	ns
Average current in a pulse	0.78	A
Pulse repetition	300(100)	Hz



陽電子源の配置・選択

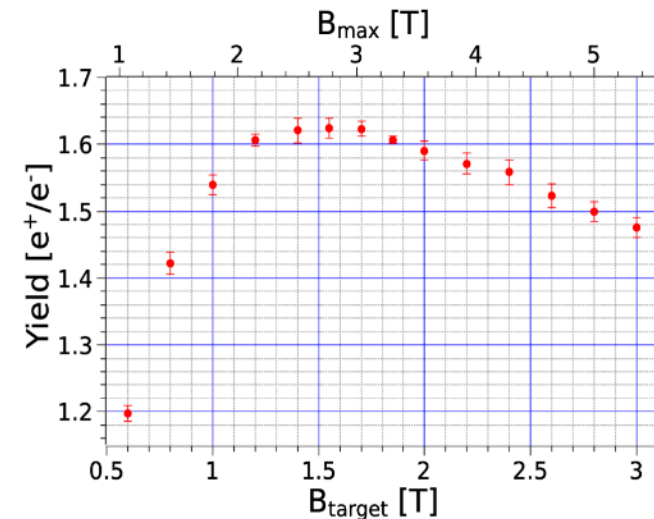
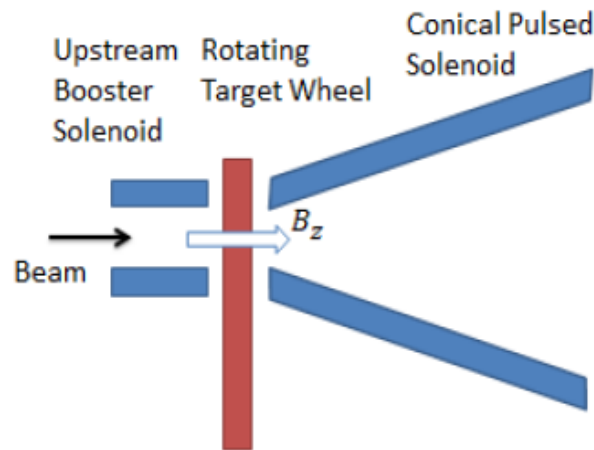
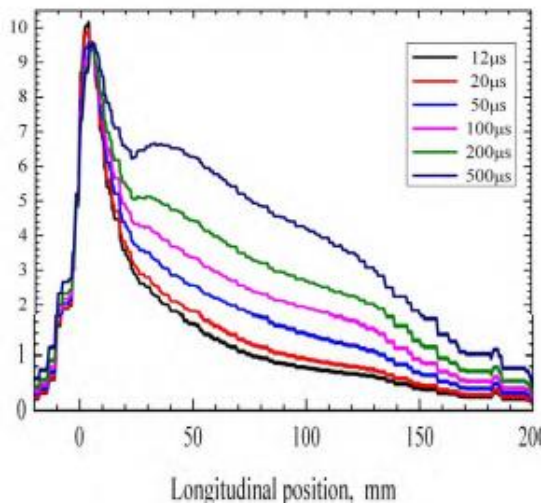
- 2つの方式で異なるトンネル構成が必要
- 電子駆動方式は、別トンネルに設置
 - アンジュレータ方式のスペースは将来の偏極陽電子へのアップグレードのために確保
 - 後からアンジュレータシステムを設置可能
- アンジュレータ方式を選択した場合、電子駆動方式のための別トンネルは建設されない。



- 陽電子源決定の時期
 - 残された研究開発のための十分な時間を確保
 - できるだけ早い段階で設計を確定すること(内部レビュー→外部レビュー→予算要求)
- Pre-Labの3年目の半ばに技術選択を予定
 - ワークパッケージの中に、この期限までに結果を出さなければならないものもある

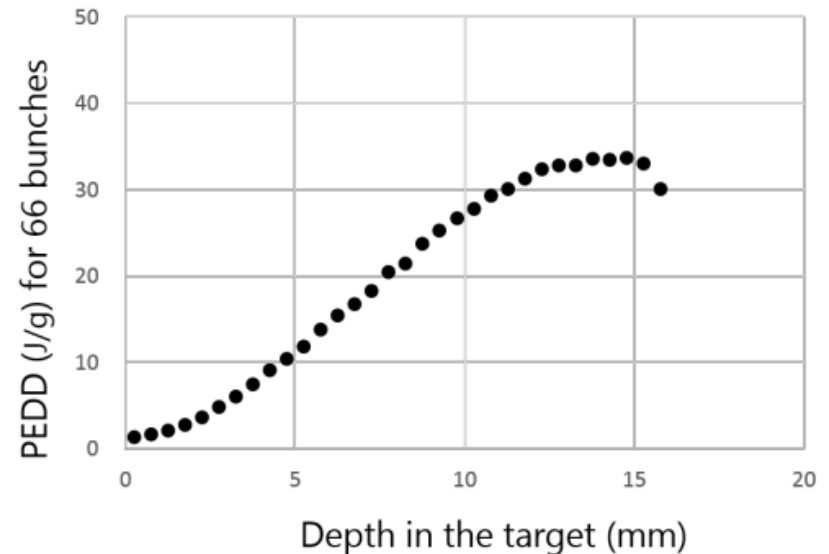
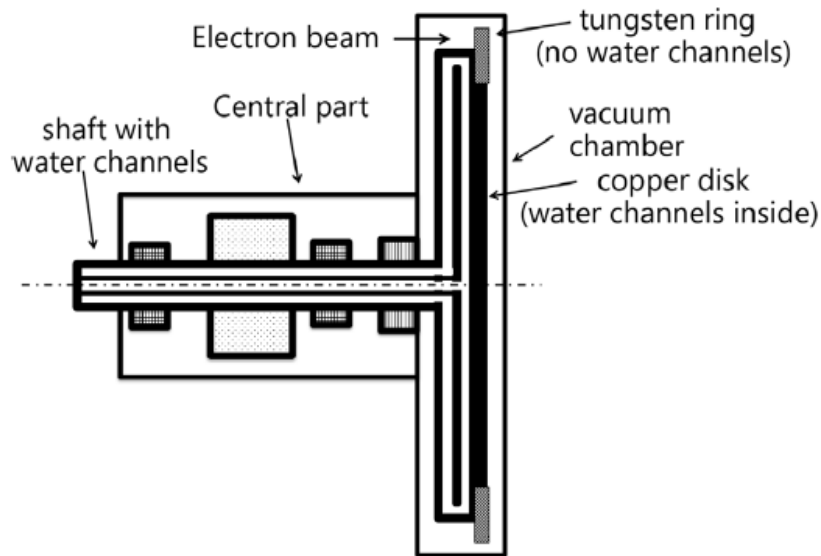
WP-7: 磁場収束

- 課題は、目標とする陽電子収率を実現すること。
- TDRでは、Optical matching device(OMD)として3.2Tのピーク磁場を持つ収束装置を採用しており、約1msの磁場フラットトップを期待したが、長パルスでは、表皮効果のために磁場の時間変化が避けられないことが判明。
- **パルスソレノイドを用いた改良型**の設計を検討中。
- QWT(Quarter Wave Transformer)、プラズマレンズ、新しい集光装置などを用いた設計も検討されている。
- WP-7では、設計を最終決定し、プロトタイプを製作して、プロトタイプ・ターゲット・システムで試験を行う。



WP-8 電子駆動用回転ターゲット

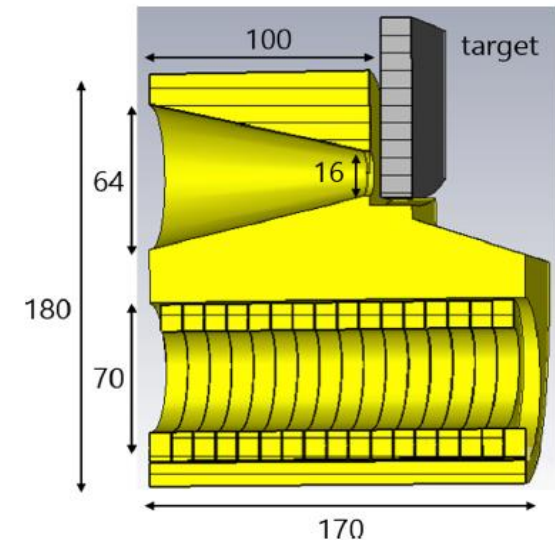
- 電子駆動型では、陽電子生成ターゲット材料はW-Re合金で、冷却用水路を持つ銅製ディスクに取付。
- 直径0.5m、厚さ16mmのターゲットを、225rpmで回転。
- 磁性流体により真空は保持される。
- 回転軸とユニット本体の隙間に充填してシールを形成し、永久磁石で固定。
- モーター、ベアリング、吸水口の回転ジョイントなどは空気に曝されている。
- ターゲットの応力や疲労をより正確に計算し、設計を改善する。
- プロトタイプを用いて信頼性の高い長期運転を確認する。



WP-9: 電子駆動用磁場収束

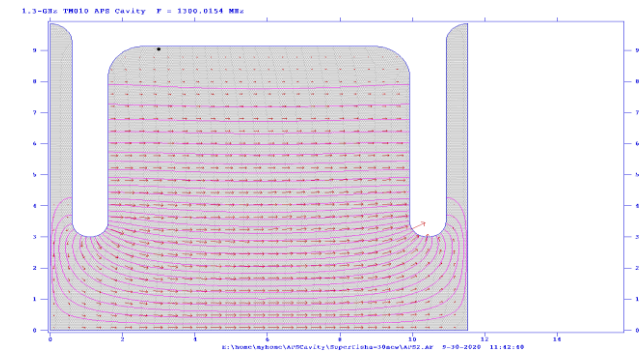
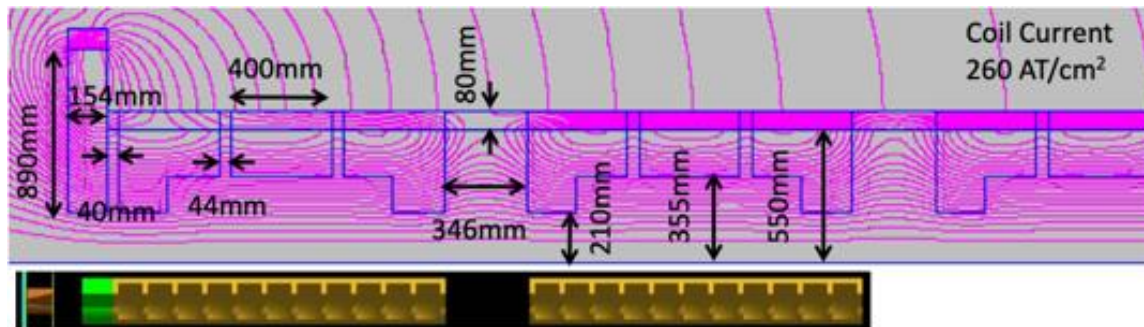
- 電子駆動型における磁気収束のために、**フラックスコンцентрレーター(銅製の2導体のを使った磁場収束装置)**を利用
- 一次導体は螺旋状のコイルで、軸に沿って磁界を発生
- もう1つの部品は二次導体で、一次側の磁界によって誘起された二次導体の渦電流が流れ、**円錐状の空間に磁界を発生**させる。
- 軸に沿って5Tの磁界が誘起される。ビームホールの直径は16mmである。
- 磁気収束装置の工学設計を完成させる。
- 導体の熱・電気設計、伝送路設計、電源設計などが含まれる。
- システムの試作を行い、確実に動作することを確認する。

Parameter	Value	Unit
Peak field	5.0	Tesla
FC size	120 x 180	mm ²
Conical cavity length	100	mm
Front aperture diameter	16	mm
Rear aperture diameter	64	mm
Number of windings	16	turns
Ohmic loss	14	kW



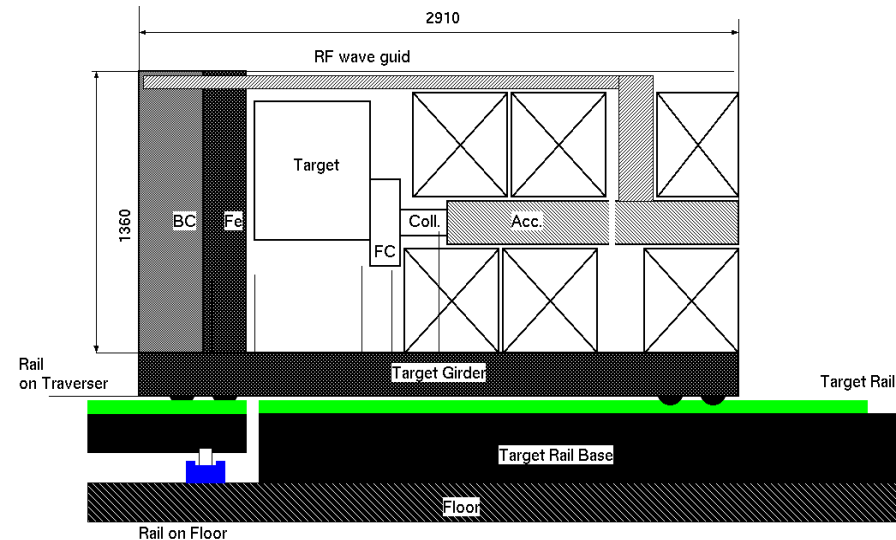
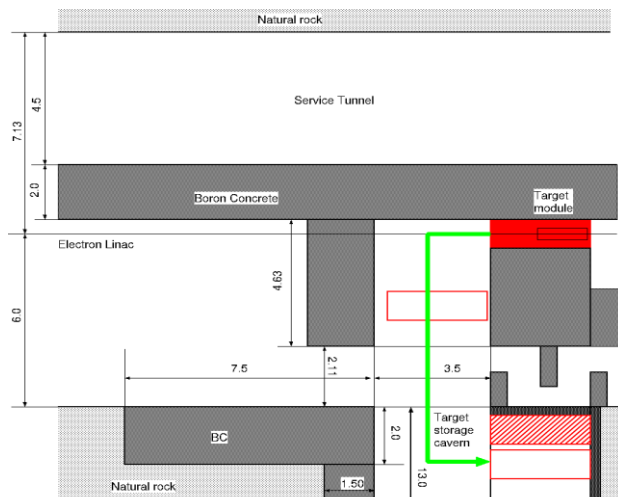
WP-10: 捕獲空洞

- キャプチャーリアックは、0.5Tのソレノイドで囲まれた**APS空洞(捕獲空洞)**で構成される。
- 開口部が広く、 π モード定在波空洞よりもRF安定性に優れている。
- クライストロンは、50MWの電源を $2\mu\text{s}$ のパルス幅で供給する。
- この条件より性能の高いSバンドのクライストロンは存在するが、設計を発展させた**Lバンドクライストロンの製作する**。
- キャプチャーリアック用**APS空洞のRF設計と試作、電源ユニットの試作、ソレノイドの試作、空洞と電源の試運転**を行う。
- キャプチャーリアックの動作モードは、減速キャプチャー方式という特殊なものであるため、**ビーム負荷の補正や調整方法を検討**する必要がある。



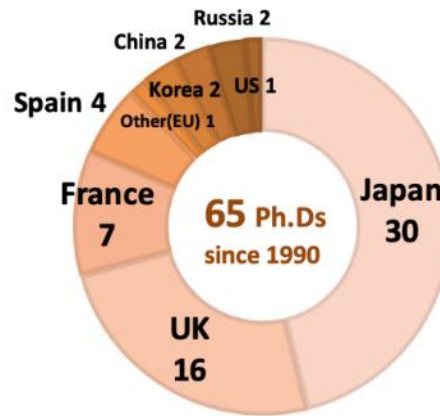
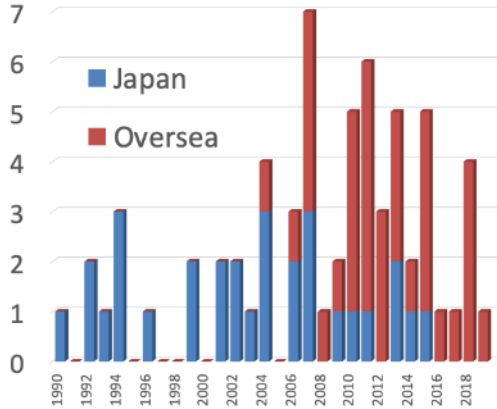
WP-11 Target Maintenance System

- 陽電子源ターゲットからの放射線は、厚さ2mのホウ素化コンクリートのシールドによって閉じ込められる。
- 100時間の冷却後も、ターゲット表面には10Sv/hの線量。
- ターゲットは放射線損傷のため、**2年ごとに交換**しなければならず、交換の際には、作業者の放射線被ばくを十分にコントロールする必要がある。
- ターゲットモジュール**は、ターゲット、収束器、第一加速空洞などで構成。
- RF、電力、水、制御などの接合部の多くは、モジュールのフロントパネル上に組み立てられており、これらの接合部を安全に切り離す。
- WP-11では、ターゲット交換システムの**技術設計を完成させ、モックアップを製作**する。

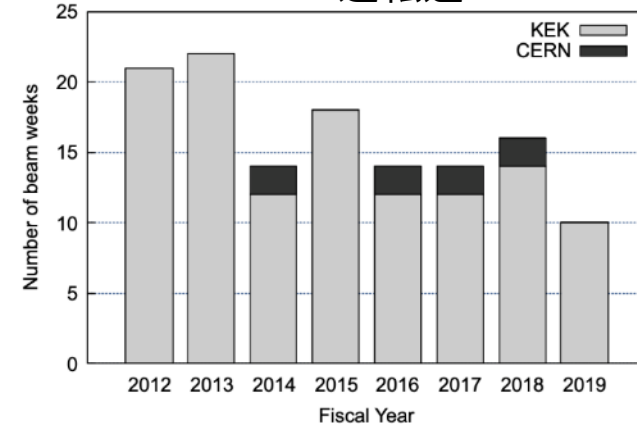


ATF運転

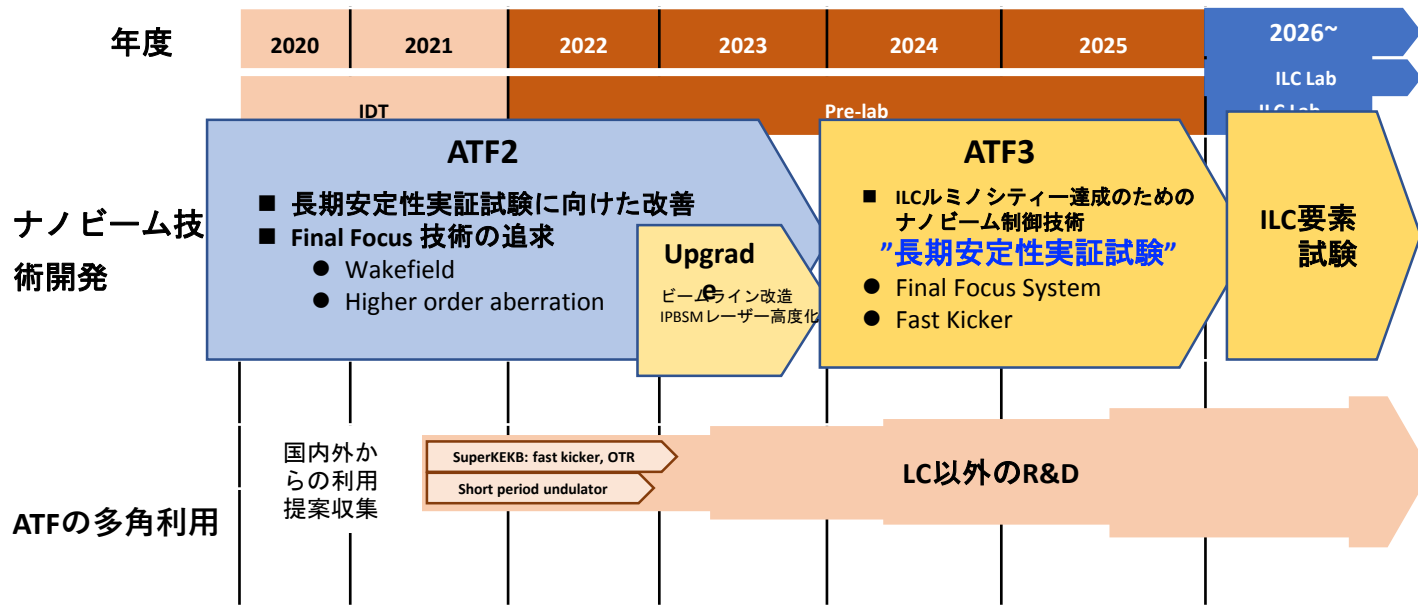
ATF関連の博士論文数



ATF運転週



ATFはナノビーム試験を遂行しつつ人材育成を行ってきた。



準備研究所期間にビームライン改造・モニター高度化などを実施し、長期安定性実証試験、最終収束系の設計最適化に取り組む。

ATF

- 1991 Linac建設開始
- **1996 Damping Ring 稼働開始**
 - モニター開発 (Wire scanner, X-ray SR, Laser wire, Laser Compton, Cavity BPM,...)
 - マルチバンチビーム技術
 - **2003 低エミッタンス 4 pm達成**
- **2005 ATF International Collaboration 発足**
 - **ATF2建設の国際協力 : 設計、In-kind(電磁石、電源、Cavity BPM,...)、運転、実験**
- **2009 ATF2 final focus beamline稼働開始**
 - 2010 300 nm
 - 2011 震災 → 復旧
 - 2012 70 nm
 - **Fast Kickerでのマルチバンチビーム取り出し実証**
 - **Intra-train fast feedback実証**
 - **2016 41 nm達成**
 - ~2019 Wakefieldの検証
- **ATF3の準備 → ILC準備期間 : 高度化したATF final focus systemでの実証試験**

国際協力で行われているATFでのナノビーム開発

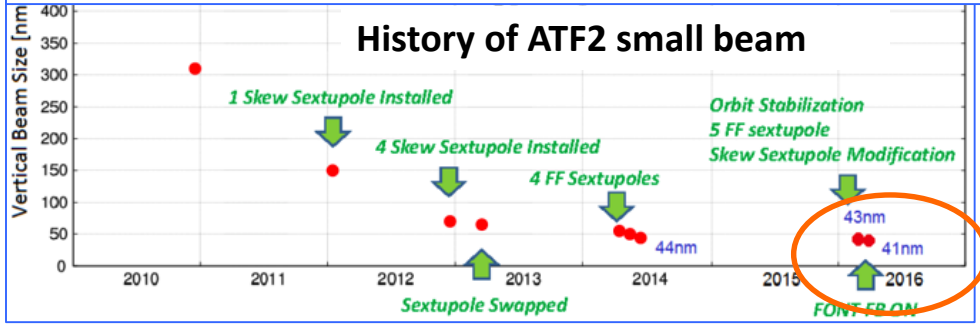
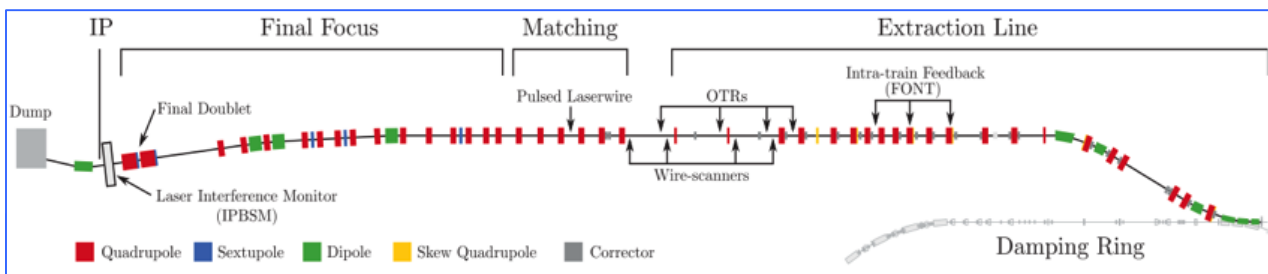


Goal 1: Establish the ILC final focus method with same optics and comparable beamline tolerances

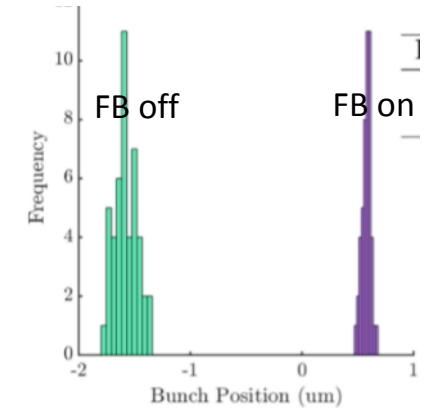
ATF2 Goal : **37 nm** → ILC **7.7 nm** (ILC250); **achieved 41 nm** (2016)

Goal 2: Develop the position stabilization for the ILC collision

- **FB latency 133 nsec achieved** (target: < 366 nsec)
- **positon jitter at IP: 106 → 41 nm (2018)** (limited by the BPM resolution)



Nano-meter stabilization at IP (2018)



ATF Review 2020

29 Sep 2020, 19:30 → 30 Sep 2020, 00:00 Asia/Tokyo

- Charge 1: Evaluate the scientific results at ATF/ATF-2
- Charge 2: Evaluate future ATF operation for LC R&Ds
- Charge 3: Evaluate future ATF operation (other than LC)

国際協力により2020年までの成果をレポートにまとめ、9月にATFレビューも開催された。

ATF Report 2020:
https://agenda.linearcollider.org/event/8626/attachments/35702/55436/ATF_Review_Report_2020_0831.pdf
 ATF Review:
<https://agenda.linearcollider.org/event/8626/>

Masahiro Katoh Hiroshima U.
 Katsunobu Oide (chair) KEK/CERN
 Tatiana Pieloni EPFL
 Vladimir Shiltsev FNAL
 Zhentang Zhao SARI

ATFレビュー(2020 Sep.29-30)

<https://agenda.linearcollider.org/event/8626/>

ATF Review 2020

29 Sep 2020, 19:30 → 30 Sep 2020, 00:00 Asia/Tokyo

<https://zoom.us/j/95322225259> (Zoom)

Description Charge 1: Evaluate the scientific results at ATF/ATF-2
Charge 2: Evaluate future ATF operation for LC R&Ds
Charge 3: Evaluate future ATF operation (other than LC)

Masahiro Katoh Hiroshima U.
Katsunobu Oide (chair) KEK/CERN
Tatiana Pieloni EPFL
Vladimir Shiltsev FNAL
Zhentang Zhao SARI

ATF/ATF2での科学的成果

ATF/ATF2で達成された傑出したユニークな成果が評価された。

- スポットサイズは40nmと、他の加速器では最小である。
 - バンチ軌道フィードバック(FONT)。
 - リング内での垂直エミッタンス4pmは今世紀初頭で最小。
- 委員会はまた、様々な加速器コンポーネントの先駆的な開発も高く評価する。

- 立ち上がり/立ち下がり時間が3ナノ秒以下の高速抽出キッカー。
- ビームサイズ1 μ mのレーザーワイヤー
- 20 nmの分解能を持つキャビティBPM
- シングルおよびマルチOTR/ODRビームプロファイルモニター

これらの装置のいくつかは、**CERNのPSや放射光源など他の加速器にも適用**されている。

また、**国際協力の下で大学院生や若手科学者を教育したこともATFの成果**であり、この点ではKEKで最も優れたプロジェクトである。

今後のLC研究開発のためのATFの運用

委員会は、ATF/ATF2での成果が、ILCのためのビーム集束と制御に関する**最低限の技術的実現可能性を既に確認**していることを認識している。しかし、**今後、さらなる調査研究を展開しうる幾つかの可能性があると考える。**

- スポットサイズに対する強度依存性の影響
- 水平方向の β^* が小さい場合での光学収差
- ビームハローとコリメーション
- 高いクロマティシティでの小さなスポットサイズ

ビームスポットの研究以外にも、ILC準備に役立つ他の構成要素の研究にもATFの可能性あることを委員会として指摘する。

- 偏光電子源、そのビーム輸送とダンピングリングへの蓄積。
- レーザーや他のビームを用いたビームコリメーションの研究。
- ILC DRのビーム取り出し時の高速フィードバックをシミュレートするためのリング1周以内のビームフィードバック。

今後のATF運転(LC以外)

委員会としては、このユニークな施設を他分野の科学に活用するための可能性を探る努力を評価したい。最近の国内ワークショップでは、すでに10件以上の提案が集まっている。委員会は、ATFチームがこの取り組みを国際的に拡大していくことを奨励している。このような活動は、状況によってはILCの準備と重なることもあるが、**当委員会はILCが始まってもATFの科学的価値は尽きることはないことを述べたい。**KEKは、**ATFの科学的可能性を十分に探る前に、研究を停止することを考えるべきではない。**

Remarks

委員会はATFの科学的成果と将来の可能性を確信しているが、今後数年間のILCの準備計画と、過去5年間のATFの運用実績(運転時間、人材、予算)の減少との間に大きな隔たりや矛盾を感じている。当委員会としては、このようなILCの将来計画の実現可能性を判断することはできないが、このような状況に強い懸念を表明する。このような加速器施設を年間5週、10週しか稼働させないのは非効率的である。時間と予算と資源の無駄遣いである。

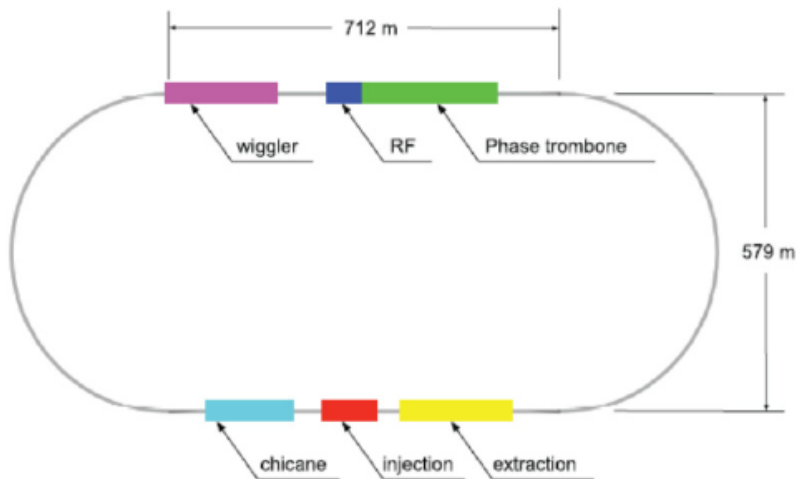
ダンピングリング

- ダンピングリング (DR) は、電子・陽電子源と主線形加速器の間の円形加速器。
- ILC用の高品質な電子・陽電子ビームを作る。

WP-12 システム設計: ILC250の水平エミッタンス低減のためのビーム光学系の変更を受け、再度**最適化**する。ダンピングリングに**永久磁石**を使用する可能性についても検討。

WP-13 集団効果: DRビーム光学系による**バンチ粒子の集団現象を評価**。インピーダンス・ビーム不安定性、空間電荷効果、陽電子リングの電子雲効果、電子リングのイオン効果など。**高速イオン不安定性に対応するためのフィードバックシステムの設計、試作、試験**。

WP-14 入出射: ダンピングリングの入射・出射用**高速キッカーのシステム設計**は、DRのダイナミックアパーチャの更新を考慮。



Circumference	3.2 km
Beam energy	5 GeV
RF frequency	650 MHz
Bunch population	2e10
Number of bunch	1312
Beam current	390 mA
Normalized emittance (x / y)	4.0 μm / 20 nm
Dynamic aperture ($\gamma(A_x + A_y)$)	0.07 m
Long. Acceptance ($\Delta E/E \times \Delta z$)	$\pm 0.75\%$ x ± 33 mm
Damping time (x / y / z)	24 ms / 24 ms / 12 ms
Store time	200 ms

WP-12: DRシステム設計

- DRのダイナミックアパーチャは、理想的な電磁石を仮定して評価していたが、円形加速器では、電磁石の多極極誤差、特に偏向電磁石のフリンジフィールドの影響を受ける。
- DR電磁石の設計、DRビーム光学系の再評価を行う。
- 現在のビーム光学系でダイナミックアパーチャを評価した後、許容範囲を維持しながら水平エミッタンスを向上させるためにDRのビーム光学系をさらに最適化する。
- WP-12では、DRの曲線部に永久磁石 (PM) を導入する可能性についても検討。
- 電磁石に比べて消費電力や運用コストを削減でき、電気・冷却などのインフラが不要であるが、固定磁場で、温度に敏感であること、放射線の影響を受けやすいデメリットもある。
- ILC準備研究所期間中には、磁場が調整可能なPMをいくつか試作し、PMの磁場の均一性、安定性、放射線損傷を調べる。実際にPMを使用するかどうかは、試作されたPMの試験結果だけでなく、第4世代の放射光源に使用されるPMの経験も含めて、様々な要因を考慮してILC準備研究所期間中に決定される。

	Original	New (long bend)
Horizontal normalized Emittance (μm)	5.74, 6.27 (IBS)	3.14, 3.97 (IBS)
Tune x/y	48.26/26.76	49.33/26.86
phase adv./cell / 2π x/y	0.21891 /0.08098	0.2250 /0.0808
Damping time $x/y/z$ (ms)	23.9/23.9/11.9	25.5/25.5/12.8

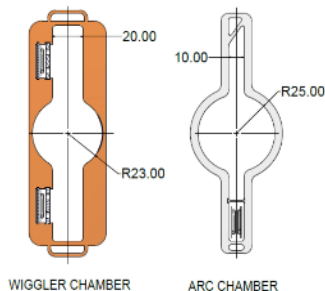
Permanent magnet development



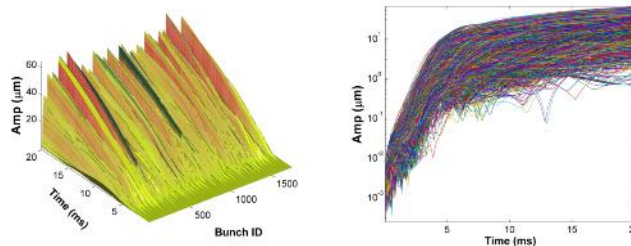
WP-13:DR集団効果

- ILC250の高輝度化のためのダンピングリングのビーム光学系変更を受け、ダンピングリングにおける**ビーム内粒子の集団現象のシミュレーション**を行う。
- この変更の前、DR内でのエミッタンス増大を引き起こす最大の要因は、陽電子DRでは電子雲(EC)不安定性と、電子DRでは高速イオン不安定性(FII)であることが確認されている。
- ここでは、この2つの効果に焦点を当てて、イオンラッピング不安定性の効果も含めて検討。
- さらにWP-13では、高速イオン不安定性を制御するための**高分解能高速フィードバックシステムのシステム設計(ビームテストを含む)も実施**。
- 高速フィードバックシステムの検討は、ILC DRに近い周長を持ち、ILC250と同様のフィードバックシステムを使っている**SuperKEKBの経験とアップグレード**に基づく。
- シミュレーションの結果、SuperKEKBとは異なる条件でのFII抑制の追加実験が必要であると判断した場合には、他の加速器で追加のビーム試験を実施する。

Vacuum chamber design for ILC DR (e+) to suppress the electron cloud (EC) instability

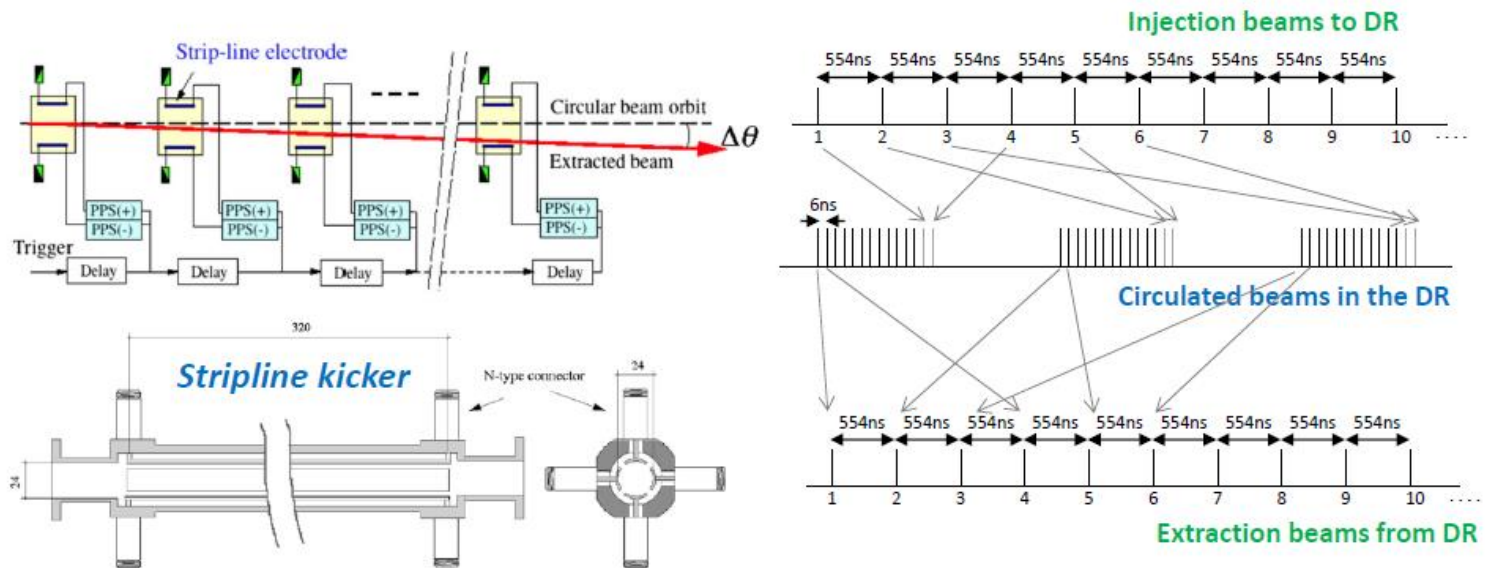


Beam simulation of the amplitude growth by fast ion instability (FII) for ILC DR(e-)



WP-14:DR入出射

- 現在のILC DRのダイナミックアパーチャを考慮すると、ストリップラインキッカーの電極ギャップを拡げる必要がある。
- それに伴い、DR直線部の光学系の微調整や入射・出射ラインの変更が必要
- ATFでは、これまでに高速キッカーシステムの原理実証試験に成功している。
- 長期安定性試験に使用するキッカーパルサーは、これまでATFの試験で使用してきたDSRD (Drift Step Recovery Diode) パルサーを使用する予定。
- DSRDパルサーで供給できる電圧は限られており、ILCでの使用には蹴り角に余裕がないため、より高い電圧を実現できる電源の開発を並行して進めていく。
- 電子駆動型陽電子源の射出システムは、他のILCの入射・出射キッカーとは異なるため、専用のキッカーを開発する必要。

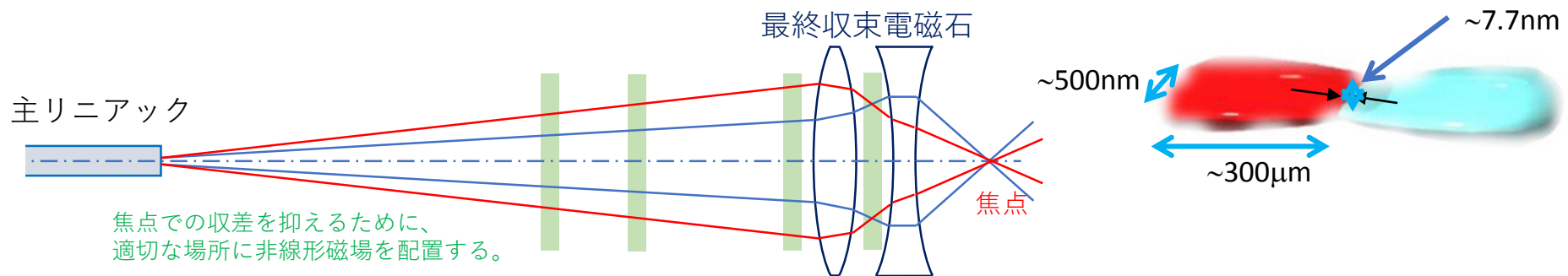


ビーム伝送システム

- ILCのビーム伝送システム(BDS)は、電子や陽電子ビームを必要なサイズに絞り、衝突させ、最後に使用済みビームをメインビームダンプに運ぶ。
- ILCのBDSは、1TeVまでの幅広い重心エネルギーをカバーするように設計。準備研究所期間で再最適化する。

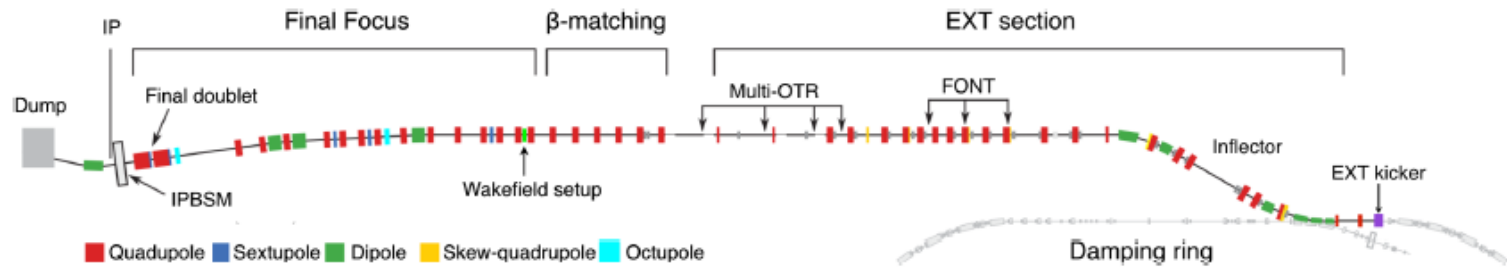
WP-15 最終収束: 最終収束システム(FFS)は、電子・陽電子ビームを衝突点(IP)でナノメートルスケールに絞り込み、**ビーム位置をナノメートルオーダーで制御する**。準備研究所期間には、長期的なビーム安定性の試験をおこなう。この安定性試験は、FFS設計の再最適化に貢献し、ビーム調整技術とそれに関連するハードウェアを確立する。

WP-16 最終収束磁石: 超伝導ファイナル・ダブレット磁石の技術は、ILC TDR用の短い多重極コイルのプロトタイプで実証されたが、**超伝導磁気コイルの巻線技術はTDR以降大幅に進歩**しており、再最適化を行う。

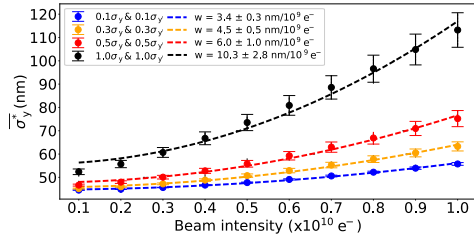


WP-15:最終収束

- ATF2では**41nmの垂直ビームサイズ**が得られている。(ATF2の37nmがILCの7.7nmに相当)
- 制御システムやフィードバックシステム、ビーム収束や焦点位置の長期安定性に関する指摘された技術的懸念に対処するため、**準備研究所期間中にATFでの実験**を予定。
- ILCの最終収束システム(FFS)の設計については、ATF/ATF2共同研究で得られた成果をもとに、**ビームダイナミクス、ハードウェアの選択、長期安定運転**などの観点から評価する。
- ILC最終収束**ビームラインシステムの高度化**を図り、ILCの初期エネルギーである250GeVでのFFSの設計最適化。

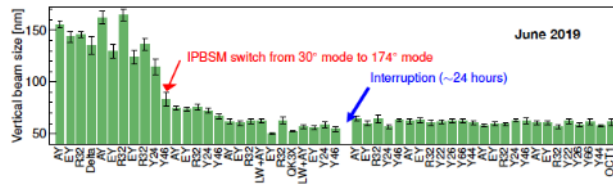


Long Term stability



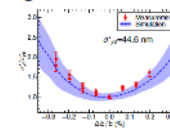
Intensity dependence studies

High-order aberrations



Ultra-low β^* studies

Energy bandwidth



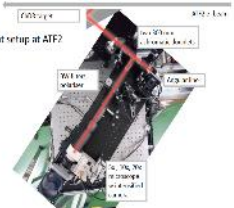
Instrumentation R&D



Collimator



Waveguide BPM

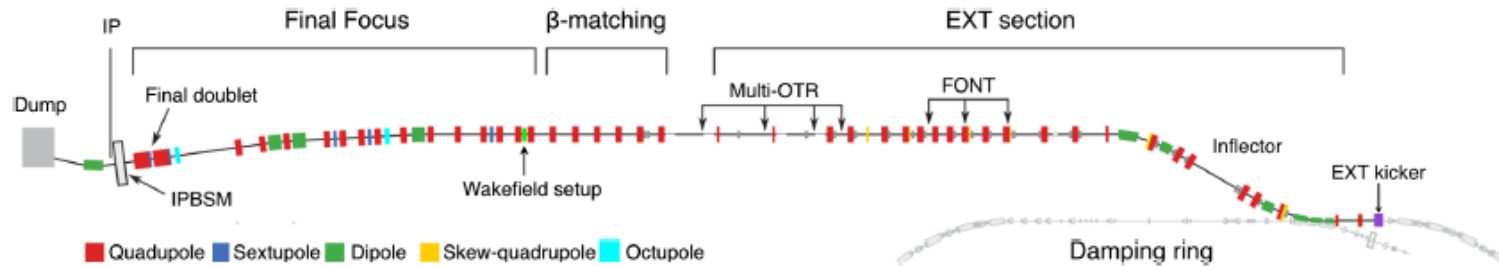


Incoherent Diffraction Cherenkov Radiation Monitor

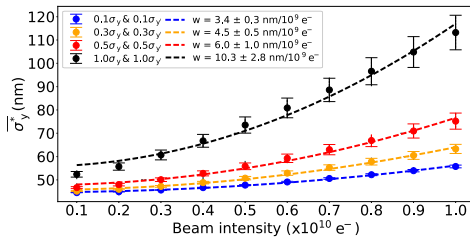
ILC final focus system (FFS) - ATF3 objective and collaboration:

WP-15

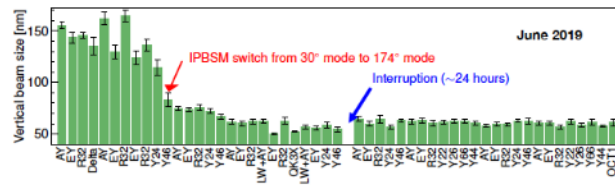
Based on the achievements of the ATF2, ATF3 plan is to pursue the necessary R&D to maximize the luminosity potential of ILC. In particular the assessment of the ILC FFS system design from the point of view of the beam dynamics aspects and the technological/hardware choices and the long-term stability operation issues.



Long Term stability

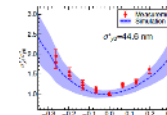


High-order aberrations



Ultra-low beta* studies

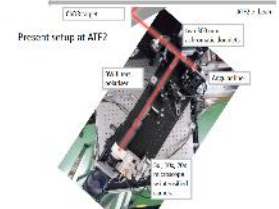
Energy bandwidth



Instrumentation R&D



Collimator

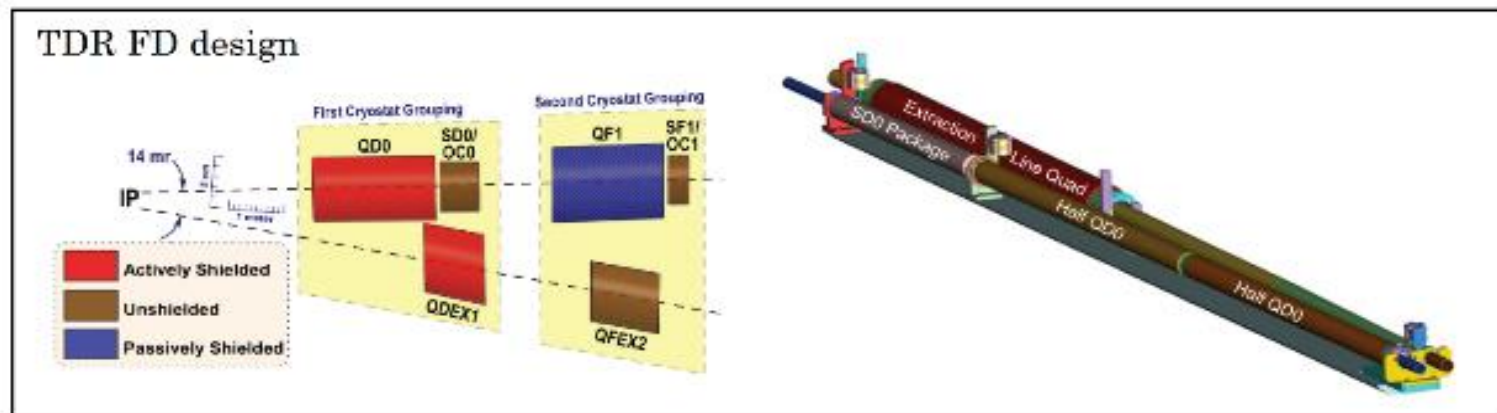


Waveguide BPM

Incoherent Diffraction Cherenkov Radiation Monitor

WP-16:最終収束磁石

- 最終収束ダブレット(FD)は、衝突点で小さなビームサイズを生み出すもので、2台の超伝導四極電磁石(QD0とQF1)で構成
- 超伝導コイルの巻線技術は、TDRが完成後も大きく進歩しており、TDR完成後に開始した加速器プロジェクトの衝突点(IR)には新たな技術オプションが提案・実装されている。
- WP-16では最新の技術やビーム光学設計の進歩を考慮に入れてFD設計の再最適化を実施。
- FD設計へのインプットとして、QD0電磁石の低温システムによる振動に対する安定性も調査
- ILCのルミノシティはQD0電磁石の安定性に大きく影響される。QD0の垂直方向の変動は、トレン内衝突フィードバックシステムの範囲内に収めるために約50nmを超えてはならない。
- この条件は、既存の加速器では経験できないものである。このため、QD0の振動を最小限に抑えるために、QD0の冷却に超流動ヘリウムを採用した。
- この冷却システムに起因するQD0の振動は、ILC準備研究所期間中に評価する。

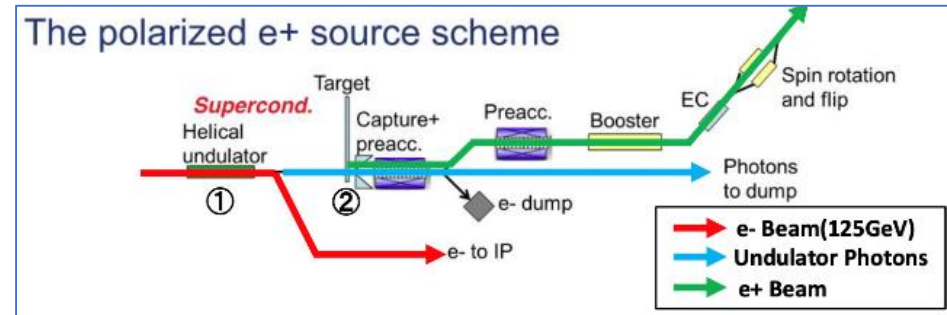
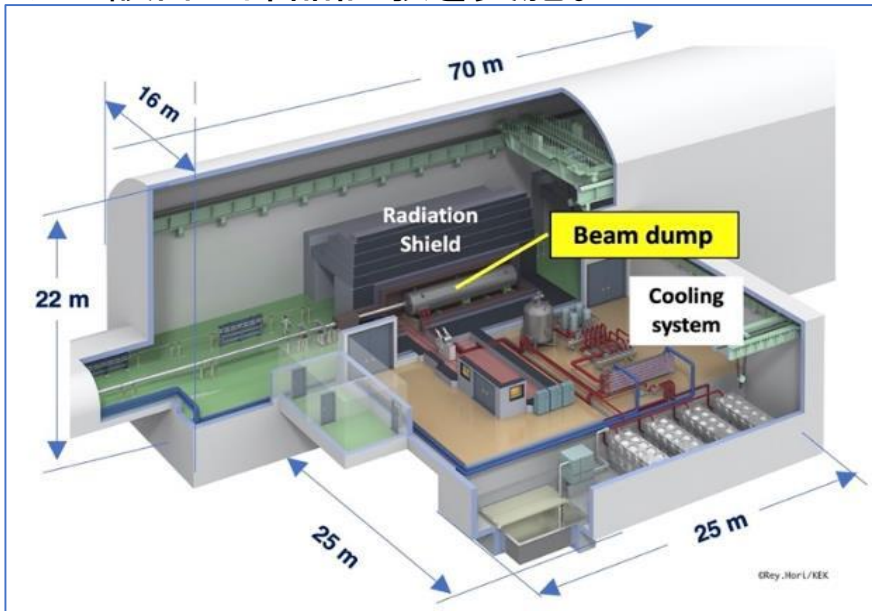


ダンプ

- メインダンプは、各ビームラインの終端で衝突後の電子・陽電子ビームを吸収する。
- メインビームダンプ部は、高い放射線量下になることが想定されるため、重心系エネルギーが1TeVまで対応。(20%の安全マージンを含め、必要な電力損失は17MW)
- TDRの設計は、SLACの2.2MWのウォーターダンプをベースにしている。

WP-17 主ダンプ: 信頼性が高く、地震に強い水ダンプシステムの詳細技術設計を実施。ビーム窓やビーム窓交換のための遠隔操作設備関連部品の試作を行う。

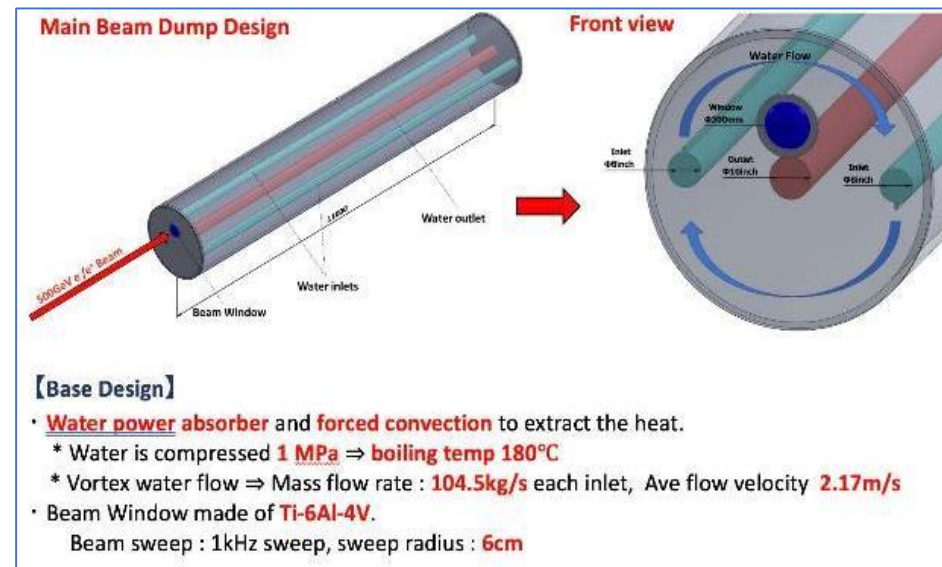
WP-18 フォトンダンプ: 技術的課題は、フォトンビームの局所的な高エネルギー蓄積。水を使ったダンプと銅板上に薄いグラファイトをベースにしたダンプの設計案があり、システム設計と部品試験を実施。



WP-17:主ダンプ

- ILC主ビームダンプの設計を進め、ビーム窓の安定性実証とその取り扱い手順など検討。
- **CERN**は大型加速器用のビームダンプと大出力ビームダンプを運用しており、**SLAC**と**JLAB**は水循環式のビームダンプの実績がある。KEKは、政府機関、産業界、科学界と協力して、環境と放射線の安全性を確保しながら、ビームダンプ施設のシステム設計を主導。
- ウォーターダンプ内の渦流システムと全体の水循環システムの**設計は、SLACとJLABでの経験**に基づき実施。
- **ビーム窓**の安定性については、放射線損傷と機械的堅牢性の観点から確認。
- Ti合金である**Ti-6Al-4V**は、陽子ビームを中心とした大出力ターゲットおよびダンプでの世界的な経験に基づき、窓材として選択。

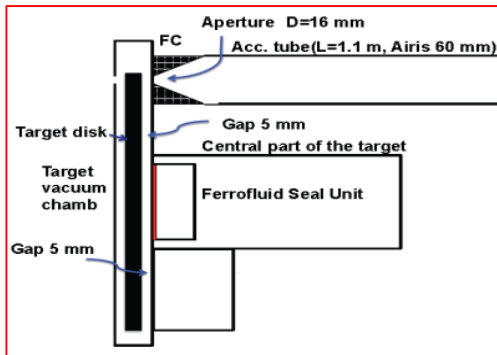
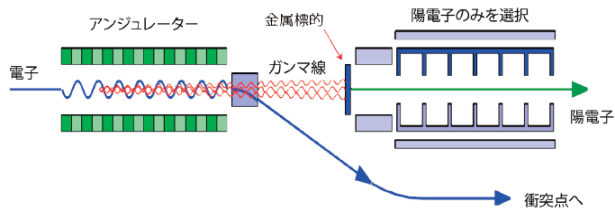
- 窓の機械的な堅牢性は、プロトタイプを密封して確認し、高放射線環境下でのメンテナンス作業のための**遠隔交換**を実証する。
- 地震対策や放射性物質を含んだ水の封じ込めなど、**安全性を確保**するための設計も重要な課題。
- メンテナンス計画の検討は、**産業界との連携**により実施する。



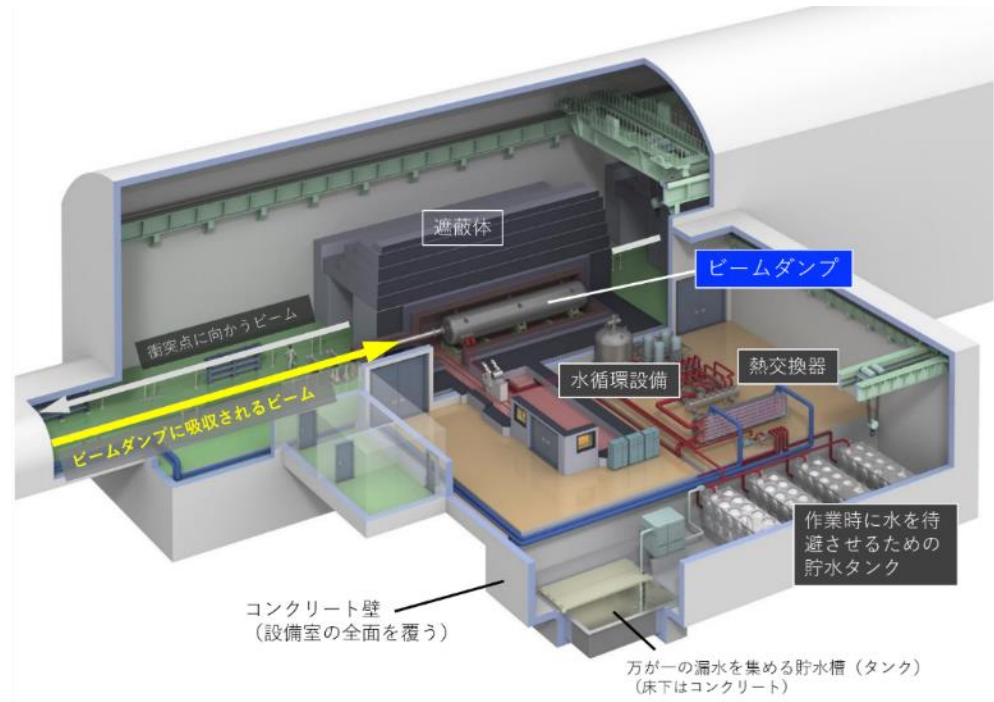
陽電子源・ビームダンプ

陽電子源について、アンジュレータ型と、従来型の電子駆動型が検討されている。

アンジュレータ型には陽電子の偏極が得られる特徴があるが、従来型の電子駆動型はこれまでの経験が活かせること、陽電子生成のための高エネルギー電子が不要なことが利点である。

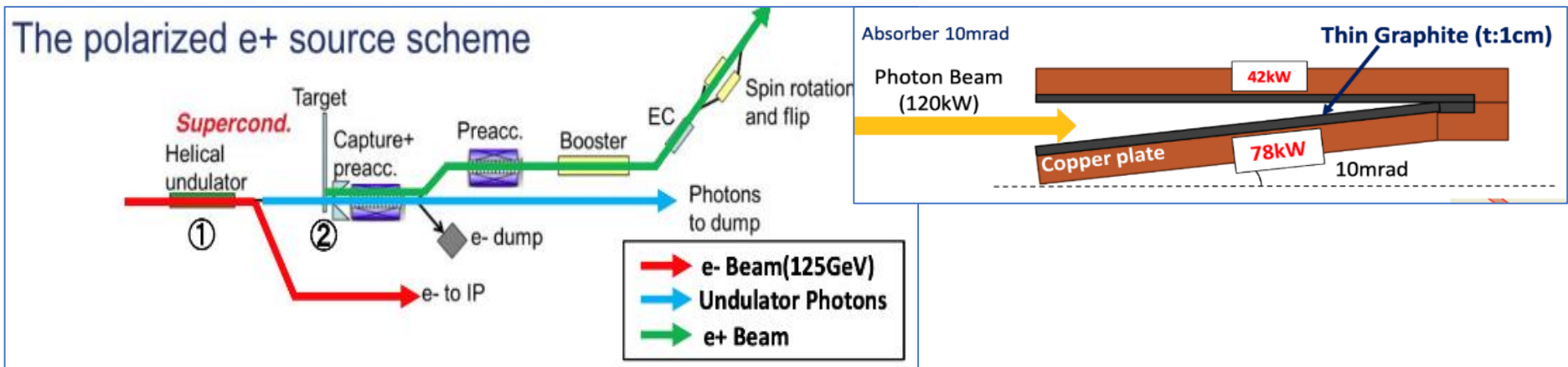


ビームダンプは、SLACの2.2MWビームダンプ（実績750kW）の設計者が設計。設計値17MWに対し、250GeV ILCでのビーム負荷は2.6MWであり、尤度は高い。

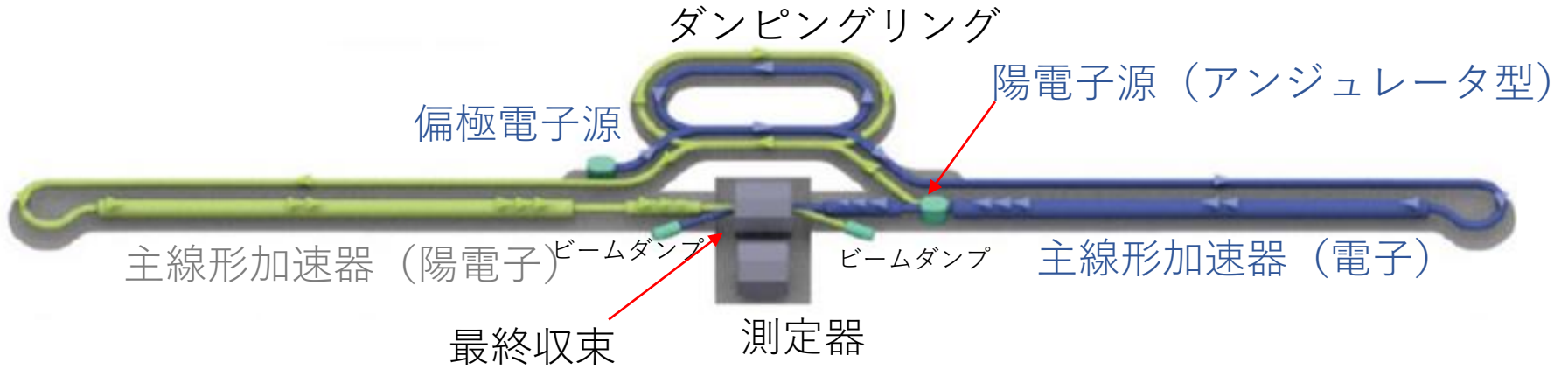


WP-18:フォトンダンプ

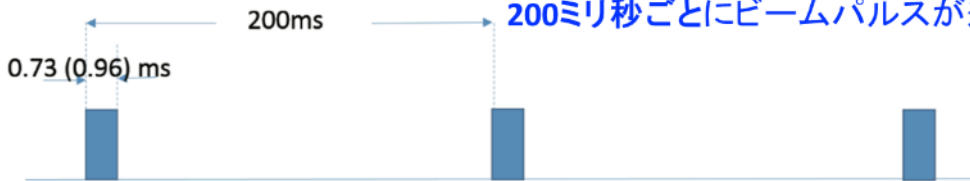
- フォトンダンプは、250GeVの高輝度モードで**最大平均120kWの電力**を吸収する。
- TDRではフォトンダンプの設計は主ビームダンプと同様のウォーターダンプを想定していたが、TDRからの変更が必要。
- 現在、2つのデザインが提案されている。1つは**水を使ったダンプ**、もう1つは**黒鉛を使ったダンプ**で、どちらも光子の負荷密度を下げるために陽電子ターゲットの**2km下流**に設置される。
- 2kmの光子輸送ラインはBDSの隣を通り、BDSのトンネルを共有する。ダンプは、RTMLとBDSのビームラインの接合部にできた空間に、適切な放射線遮蔽を施して設置することができる。
- これらの設計は、熱や放射線のダメージ解析に基づいており、特に電力吸収構造や放射化された機器のメンテナンスなどの技術的課題を取り入れて進めていく必要がある。
- これらの設計作業は、**世界中の大出力ビームターゲットやビームダンプ分野の専門家**や、**XFELや第4世代光源用の大出力フォトン吸収体**の経験者と協力して進められる。このWPの一環として、主要構造物の試作を予定している。



ILC加速器システム

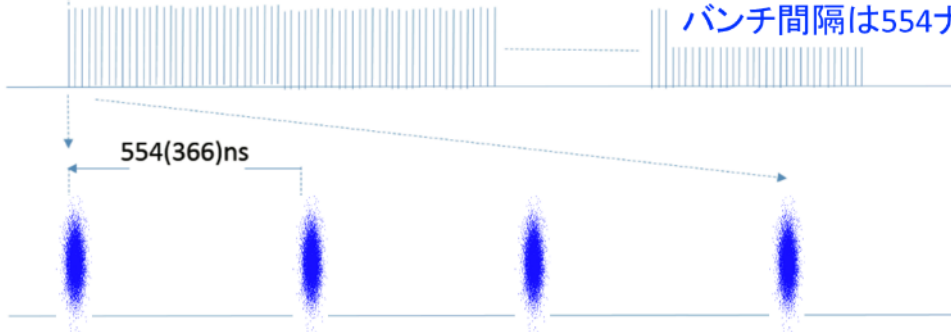


加速器は5 Hzの繰り返りで運転。
200ミリ秒ごとにビームパルスが来る。



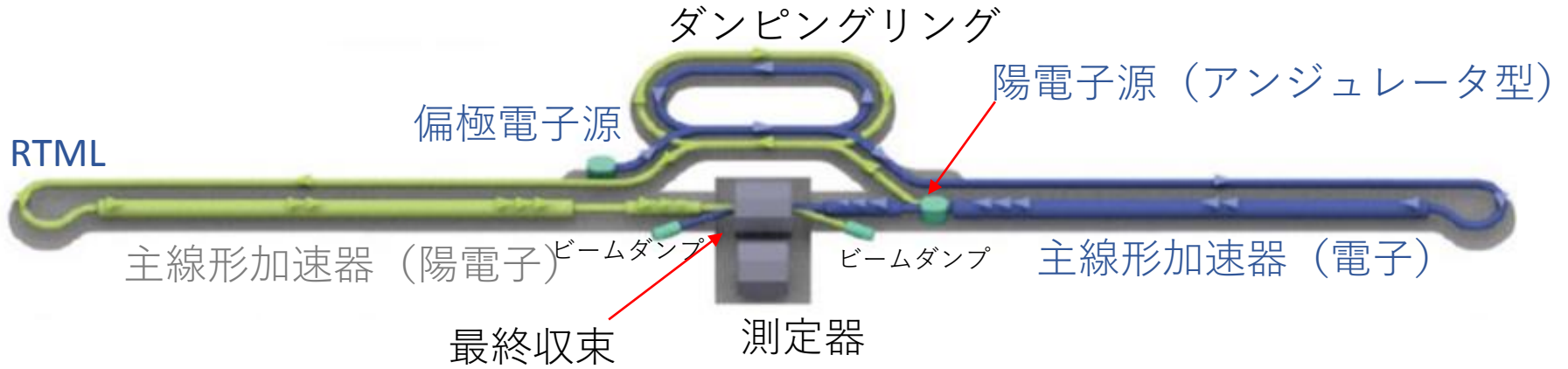
0.73 (0.96) ms
1312 (2625) bunches

各ビームパルスは、**1312**
個のバンチを含む。
バンチ間隔は554ナノ秒。



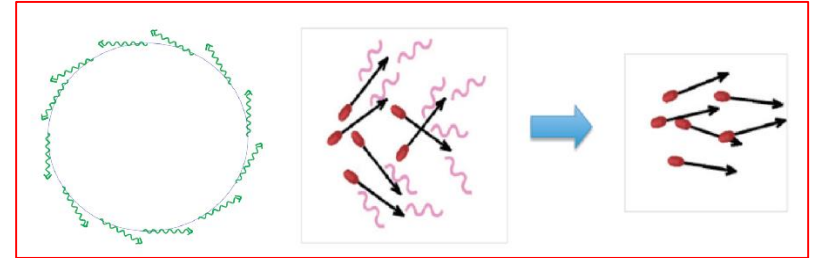
各バンチは、200億個の
電子のかたまり。

ILC加速器システム



要素部品を組み合わせて、最高の性能を引き出す。

- 粒子生成 **電子・陽電子源**
 - 偏極電子/陽電子
- 高品質ビーム **ダンピングリング**
 - 低エミッタンスビーム
 - 小さいサイズ
 - 並行ビーム
- ビーム輸送 **RTML**
 - バンチ圧縮
- ビーム加速 **主線形加速器**
 - 超伝導高周波加速
- ビーム衝突 **最終収束**
 - ナノメートルサイズのビーム



ダンピングリングでビームの平行度が高まる仕組み

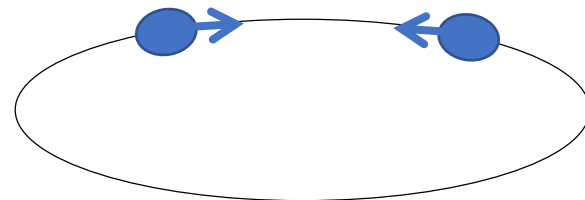


1.3GHz (L-band)超伝導加速空洞

円形加速器とリニアコライダー

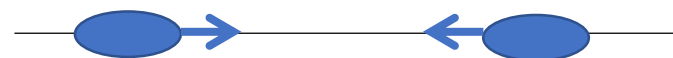
円形加速器

- ・ 周回毎に衝突する機会がある。
- ・ しかし、衝突点ではビームが周回出来る限界までしか絞れない。
(強く絞り過ぎるとビームビーム効果で回せない)



リニアコライダー

- ・ 1回作ったビームは衝突の機会が1回しかない。
- ・ しかし、極限までビームを絞ることができる。
⇒ リニアコライダーでは衝突点でビームを小さく絞ることが重要。



ILCでビームを絞るために重要なこと

1. 平行性の良いビーム
⇒ ダンピングリング
2. 性能の良いレンズ系
⇒ 最終収束系



技術的準備と文書化のタイムライン

年	技術的準備・生産準備	詳細技術文書化
1	<ul style="list-style-type: none"> SRF空洞のコスト削減R&D継続 産業界との協力によるSRF空洞の試作開始 陽電子源の開発継続 	<ul style="list-style-type: none"> 国際チームによるTDRコスト見積のレビューとアップデート開始
2	<ul style="list-style-type: none"> コスト削減のための研究開発完了 生産量歩留まりの決定 クライオモジュールへの空洞組み込み開始 陽電子源の設計レビュー 	<ul style="list-style-type: none"> 内部委員会による技術作業とコスト見積もりの進捗状況のレビュー実施
3	<ul style="list-style-type: none"> 安全性・法的側面を考慮したクライオモジュールの海外移送 陽電子源の設計を選択し重要項目の試作を開始 	<ul style="list-style-type: none"> コスト見積もり完了とその結果について内外のレビュー実施 技術的およびコスト的な問題についてのリスク分析完了 詳細技術設計報告書のドラフト作成
4	<ul style="list-style-type: none"> 移送後のクライオモジュール評価、品質保証手順実証 ILCコンポーネント製造のための地域組織を設立 陽電子源の重要なコンポーネントの試作作業継続 	<ul style="list-style-type: none"> 詳細技術設計報告書の完成と出版 入札用の仕様書や大型物品の図面作成開始