

# Positron Source

For the ILC Advisory Panel

### 3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (陽電子源)

#### 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るか技術選択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)

#### 2018年以降の取り組み

- 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。
- 多くの問題が進展をみせたが、解決すべき事項も残っている。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。

# Positron Source

- As pointed out in the Discussions to Date in 2015, there still remain issues on several subsystems, such as beam dump, positron source, electron source, beam control, and the injection/extraction of the damping ring. The technologies of these under-performing subsystems should be completed during the preparatory phase, especially for the beam dump. Long term stability and maintenance scenario of the beam window, and resistance to the earthquake should be developed and completed in the preparation period. (Advisory panel p5)
- In the main preparatory phase, it is planned that the prototype of the rotating target will be made and the magnetic focusing system immediately after the positron source will be developed. The technology selection is to be made by the second year of the main preparatory phase. The strategy should be clarified, taking into account the R&D cost. (SCJ)

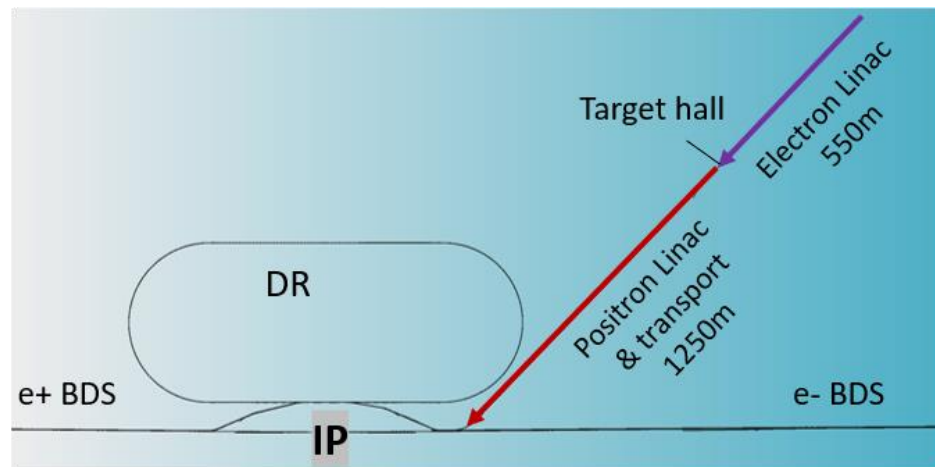
## Development Since 2018

- For the positron source, different tunnel configurations are required for the two methods. For this reason, it was decided that the electron-driven system would be installed in a separate tunnel, and the space for the undulator system would be reserved for a future upgrade to polarized positron (the undulator system can be installed later). If the undulator system is selected, a separate tunnel for the electron drive system will not be constructed.
- The technology selection is planned to be made in the middle of the third year of the Preparatory Laboratory to allow enough time for the remaining R&D on the positron source, as discussed in IDT-WG2.
- For the electron-driven positron source, the conceptual design has been completed in the spring of 2019 in collaboration with the universities and KEK.
- The civil engineering facilities and detailed design are underway under IDT; the response to the technical challenges was discussed by the International WG of KEK in October 2019, and the initiatives and potential countries for international collaboration are listed in the report.
- While progress has been made on many issues, there are still matters to be resolved. The IDT is discussing to solve the issues through international cooperation during the preparation period.

# 陽電子源の配置

- ▶ 始めにアンジュレータ型を建設する場合、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、それが最終的な形となるが、追加できない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。

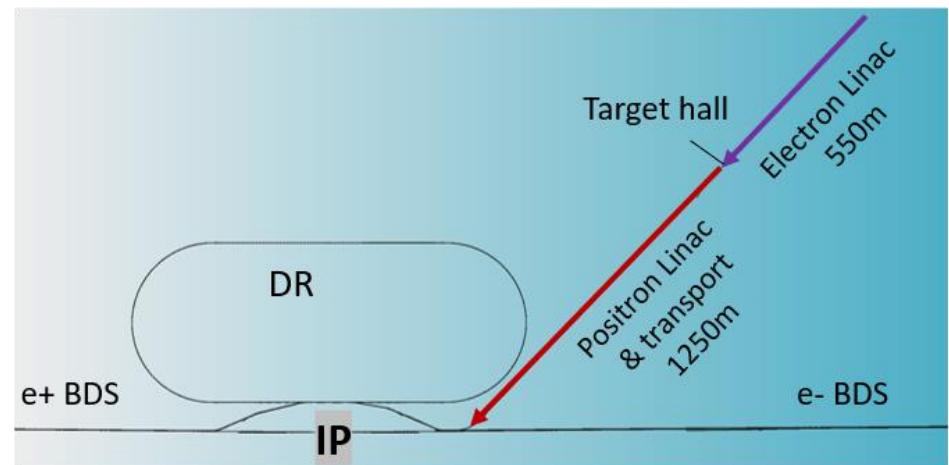
- 右図は電子駆動型トンネルの配置の一例である。45度の方向に置くことを決めたわけではない



# Configuration of Positron Sources

- In case of starting with e-driven scheme, future upgrade to the undulator scheme is needed (polarized positron)
  - ✓ e-driven source should be retained, not to be replaced
  - ✓ A separate tunnel for e-driven source should be constructed
- No update needed when starting with undulator scheme

- example layout of the tunnel for the e-driven source →
- 45 degree configuration not the final layout



### 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)

#### 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

- 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の場合と基本的には同じなので、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・英国の研究所などが興味を持っている。
- 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を進めること。
- 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課題を解決するよう、IDTで検討を行っている。

# Undulator Positron Source

- The helical undulator scheme is adopted as the positron source. It contains some technologies under development such as the cooling of the target irradiated by the gamma rays from the undulator and the replacement method of the activated target. (Adv.P. p32)
- Helical undulator scheme has no experience technically and contains many elements which require R&D. (SCJ)

## Development Since 2018

- In IDT-WG2, the University of Hamburg in particular is taking the lead in discussing countermeasures for target heat load.
- As for the target exchange method, the concept is basically the same as that of the electron-driven positron source. Hence a similar remote exchange system is envisioned.
- As for the helical undulator, a prototype that produces the required magnetic field has been fabricated previously with good results. Further parameter optimization is of interest to US and UK laboratories and others.
- The next step is to carry out the R&D necessary for detailed design and parameter optimization of the main components of the helical undulator positron source through international collaboration.
- The response to the technical challenges will be discussed by the KEK international WG in October 2019, and the initiatives and candidate countries for international collaboration are listed in the report. The IDT is discussing to solve the issues through international cooperation during the preparation period.

# Progress in the undulator scheme since 2018

## ➤ R&D areas

- ✓ Undulator operation and simulations
- ✓ Target material tests and technology
- ✓ Magnetic Focusing Systems (Pulsed solenoid and plasma lens)

## ➤ Undulator

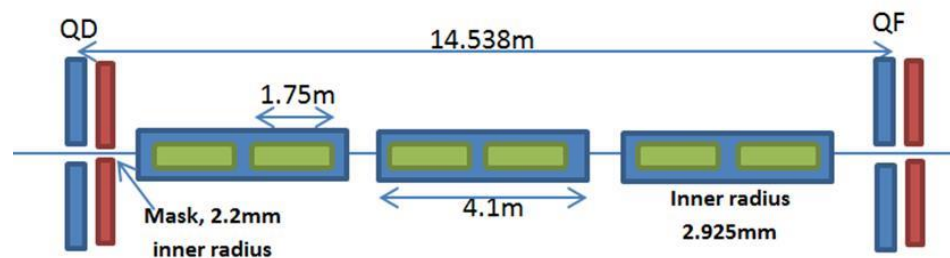
### ✓ Stable operation experience in EuXFEL

- EuXFEL: contains 5m x 91 undulators. Design energy 17.5GeV reached in 2018
- Many experiences on particle loss, alignment, orbit control, etc.
- Tolerances are even looser in ILC

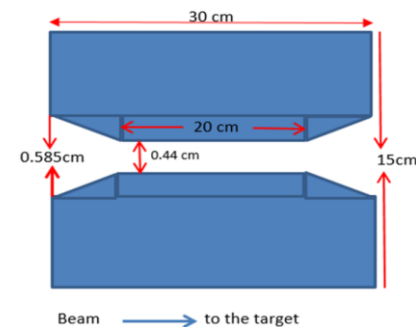
### ✓ Simulation

- Misalignment, B field error,
- Heating by radiation hitting the masks

Layout of undulator and Q magnets



Crosssection of the masks to protect undulators





# アンジュレータ方式についての2018年以来の進歩

## ➤研究開発領域

- ✓ アンジュレータの運転とシミュレーション
- ✓ 標的材料試験と技術
- ✓ 磁気収束システム（パルスソレノイドおよびプラズマレンズ）

## ➤アンジュレータ

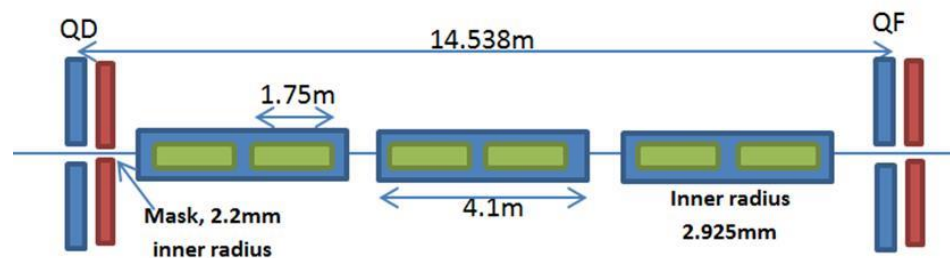
### ✓ EuXFELにおける安定運転の経験

- EuXFEL: 91台の5mアンジュレータ. 2018年に設計エネルギー17.5GeVに到達した
- 粒子損失、精密設置、軌道制御などについての多くの経験を得た
- 許容誤差はILCのほうがむし緩い

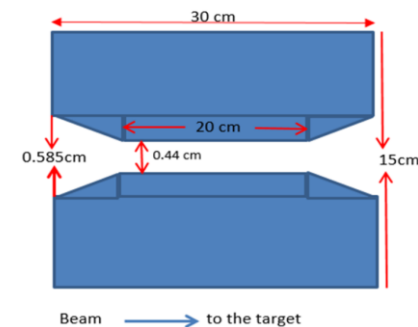
### ✓シミュレーション

- 設置誤差、磁場誤差を含んだシミュレーションを行った
- 光子によるマスクの加熱の計算を行った

アンジュレータと4極磁石の配置



アンジュレータを保護するマスクの断面図

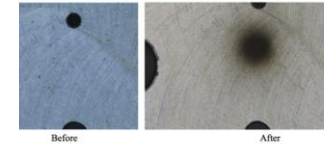


# 回転標的

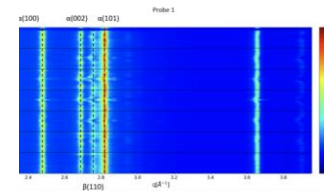
## ➤ 材料試験

- ✓ 光子のかわりに電子ビームを使った、Mainz Microtron (MAMI) での試験を行った
- ✓ チタン合金による良好な成果が得られた
  - 他の材料試験も計画している
- ✓ レーザー走査法・シンクロトロン回折法による、詳細な標的分析を行った
  - チタン合金は $\alpha$ 相・ $\beta$ 相の間の遷移がみられる
  - チタン合金は予期されるPEDD (Peak Energy Deposit Density) に耐えられる

Target before and after radiation:



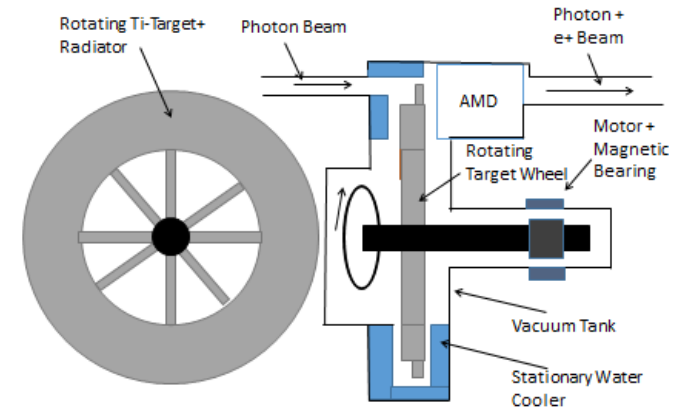
$\beta$  phase transitions in Ti-6Al-4V:



## ➤ 標的車輪

- ✓ 車輪は、直径 ~1m diameter)、真空中で 2000rpm (縁辺速度100m/s) で回転
- ✓ 2018年以後、高度な設計が行われている
- ✓ 輻射冷却が適当 (冷却水でなく)
- ✓ 車輪は高真空中で密閉されている
- ✓ 回転軸は無接触・維持作業不要な磁気ベアリングで支持されている
- ✓ 真空中で回転を維持する標準的な装置
- ✓ 技術仕様はすでに産業界との間で進んでいる

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



# Rotating Target

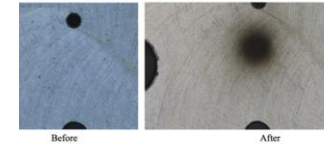
## ➤ Material test

- ✓ Mainz Microtron (MAMI) using e- (instead of photons)
- ✓ Successful results with Ti-alloy
  - other materials also being planned
- ✓ Sophisticated target analyses with laser scanning method and with synchrotron diffraction method
  - Ti-alloy shows transition between alpha- and beta-phase
  - Ti-alloy survives expected multiple PEDD load

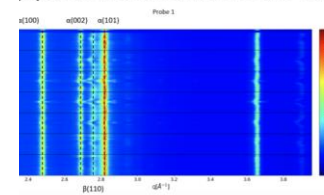
## ➤ Target wheel

- ✓ Wheel (~1m diameter) spinning in vacuum with 2000rpm (100m/s tangential speed)
- ✓ Advanced design available since 2018
- ✓ Cooling via radiation appropriate (instead of water cooling)
- ✓ Wheel completely, hermitically sealed in ultra-high vacuum
- ✓ Rotating axis supported by contactless, maintenance free magnetic bearings
- ✓ Standard components to support elements rotating in vacuum
- ✓ Technical specifications for industry already done

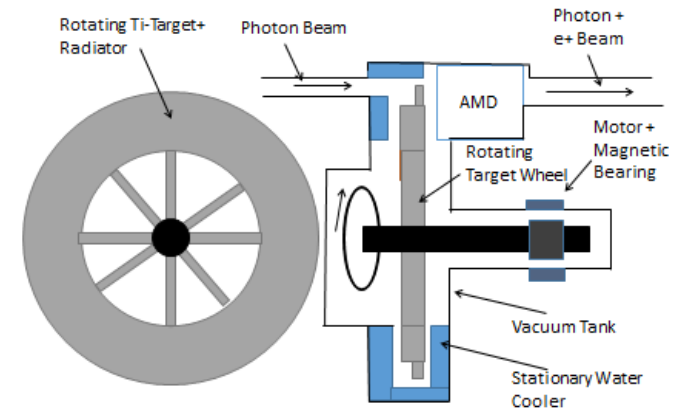
Target before and after radiation:



β phase transitions in Ti-6Al-4V:



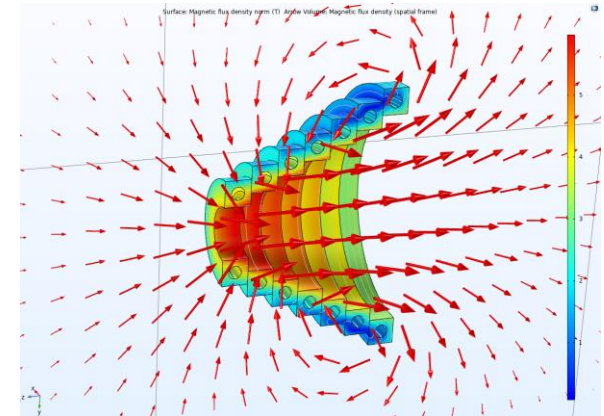
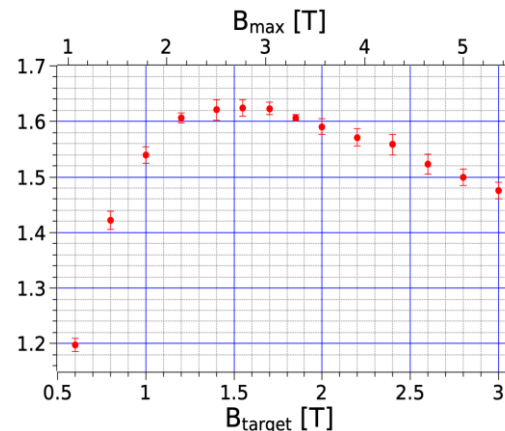
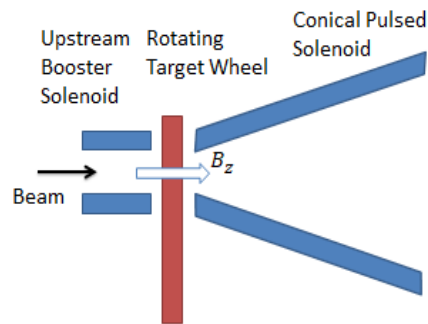
Principal Layout: Ti-Wheel with a Diameter of 1.0 m, rotating at 100 m/s, 2000 rpm.



# 磁気収束

## ➤ パルスソレノイド

- ✓ これまで仮定していたQWT (Quarter Wave Transformer) では、陽電子収量が低すぎる事が、シミュレーションで判明
- ✓ 別の収束方法としてパルスソレノイドが設計されている
  - 妥当な標的上磁場( $\sim 1.5$  T) で $1.5$  e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> 以上の終了が得られる
  - 有効性が十分確認された計算機コードによる詳細なシミュレーションが行われている
  - 詳細なシミュレーション結果はワークショップ LCWS2021 (2021年2月)で発表されている



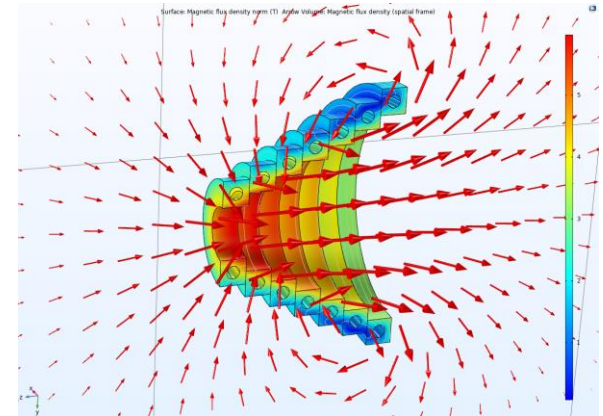
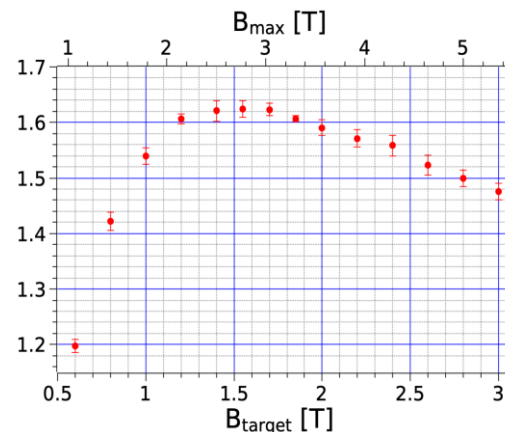
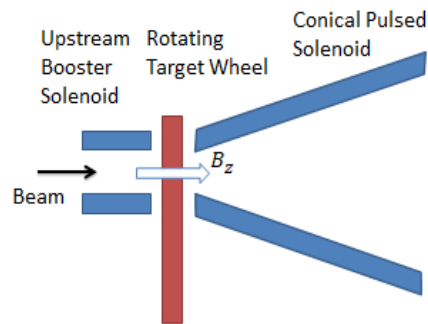
## ➤ プラズマレンズ

- ✓ 別の可能な収束方法として検討されている
- ✓ QWT の $1.5$  倍の収量が予想される
- ✓ 今後3年のうちにプロトタイプの実験が予定されている (予算承認を得ている)

# Magnetic Focusing

## ➤ Pulsed solenoid

- ✓ Simulation showed the positron yield with focusing by QWT (Quarter Wave Transformer) was too low
- ✓ Pulsed solenoid as an alternative being designed
  - Yield higher than 1.5 e+/e- achievable with moderate B-field (~1.5 T) at the target
  - Detailed simulation studies of the pulsed solenoid with proven simulation codes being done
  - Detailed simulation results shown at LCWS2021 (Feb.2021)



## ➤ Plasma lens

- ✓ Another possibility of focusing
- ✓ Expected improvement: about a factor 1.5 over QWT
- ✓ Prototype experiment within next three years (Grant application approved)

### 3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (電子駆動型陽電子源)

#### 有識者会議・学会会議の指摘

- 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劣化評価を進め、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。

# Electron-Driven Positron Source

➤ The conventional target method of positron source is not an easy target to achieve to obtain the prescribed beam intensity stably. (SCJ, p.7)

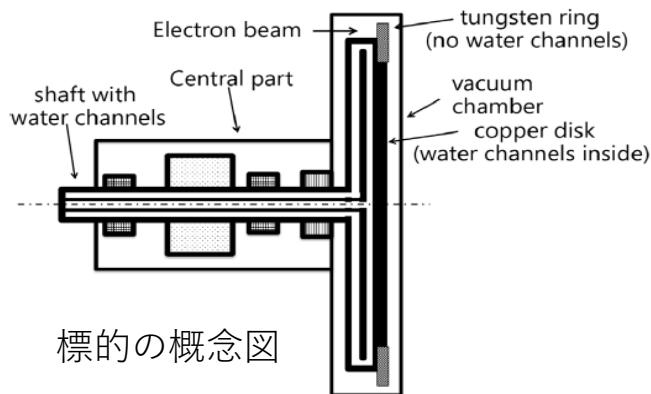
## Development Since 2018

- For the electron-driven positron source, KEK, Hiroshima University, and Waseda University are playing a central role in the research and development.
- As for the rotating target using magnetic fluid, the vacuum seal degradation due to irradiation is being evaluated, and long-term running tests of a simulated target with the same weight as the actual target are being conducted.
- The design and development of an APS cavity, which is capable of handling beam load variations, is also underway for the capture cavity in the beam convergence area.
- The next step is to evaluate the main components (rotating target, magnetic convergence circuit, and APS cavity) using prototypes.
- Design studies of an exchange system for the radiated target are underway. This is also being designed for the undulator system, as there is little difference between the two.
- The response to the technical challenges will be discussed by the KEK international WG in October 2019, and the initiatives and potential countries for international cooperation are listed in the report.
- The remaining issues are not difficult, but further discussion is underway at the IDT to resolve them through international cooperation during the preparation period.

# 電子駆動型陽電子源

## ➤ 標的

- ✓ 16mm厚 W-Re(26)合金。真空中で5 m/s接線速度で回転。
- ✓ 陽電子標的の技術課題は次の三点。
- ✓ 標的破壊
  - 標的の破壊：破壊の指標であるPEDD(Peak Energy Deposition Density, 重量当たりのエネルギー密度)は、最大で33.6 J/g. 破壊限界の70 J/gよりも大幅に低く、安全運転の指標である35 J/gを下回っている。
  - 標的の冷却：有限要素法による見積から、温度は最大で356度Cと見積もられ、冷却に問題はない。
  - 標的の真空封止：冷却チャンネルを真空内に導入するために、可動部における磁性流体真空シールを利用。
    - シール部からのガス放出係数を実測し、 $5e-8 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 以下という値を確認。加速器での圧力は $1e-9 \text{ Pa}$ 以下となり、全く問題ないレベル。
    - ILCの2年運転に相当する放射線量を照射したテスト装置で真空封止の試験を行い、長期間安定した封止性能を確認した。



標的の概念図



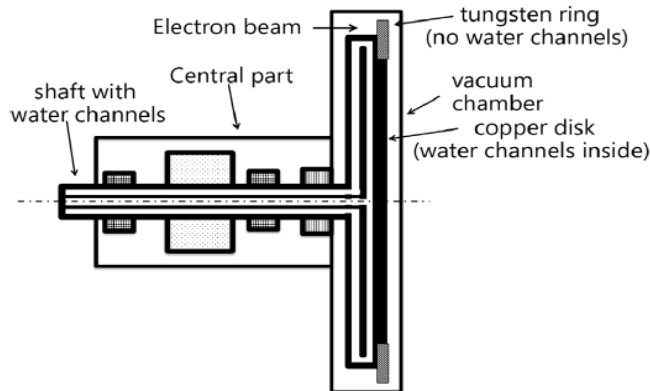
標的のプロトタイプ



# Electron-Driven Positron Source

## ➤ Target

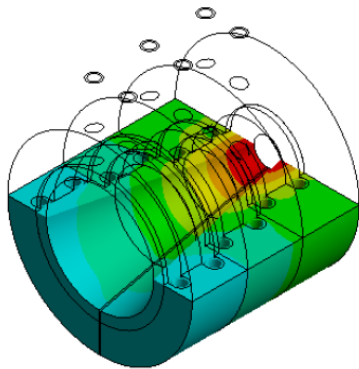
- ✓ W-Re alloy, 16mm thick, rotating with tangential speed 5m/s in high vacuum
- ✓ Target damage
  - PEDD (Peak Energy Deposit Density) < 35J/g (destruction limit 70J/g)
  - Cooling: FEM simulation showed temperature < 356 C, well below the limit
  - Vacuum seal
    - Adopted magnetic fluid seal
    - Gas emission measured <  $5 \times 10^8$  Pa.m<sup>3</sup>/s (this leads to <  $1 \times 10^{-9}$  Pa in the cavity)
    - Radiation test with ILC 2-year dose on the fluid



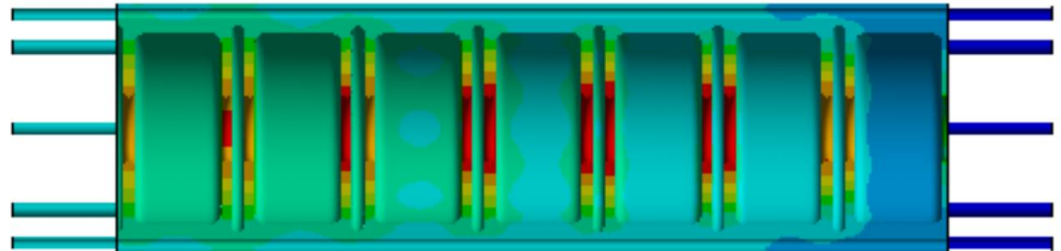
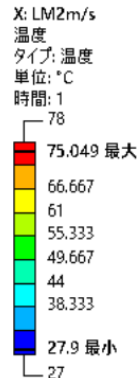
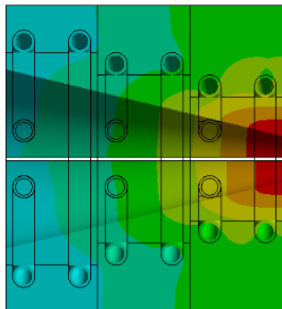
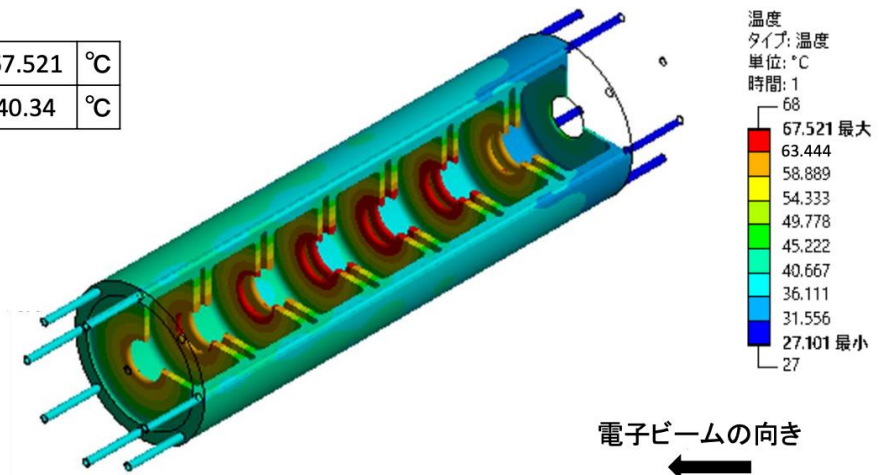


## ➤ Thermal design

- ✓ Simulation for design by FEM being done about the heat load on flux concentrator, collimator, positron capture cavity, etc.
- ✓ Temperature rise < 50 C
  - Electric and RF characterisity to be evaluated
  - Flux concentrator: < 50C including Ohmic loss
  - Collimator: < 20C
  - Capture cavity: < 50C

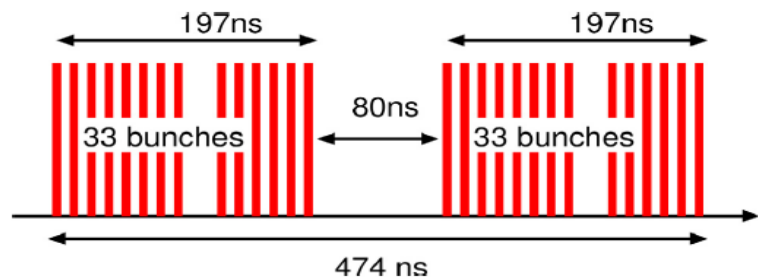
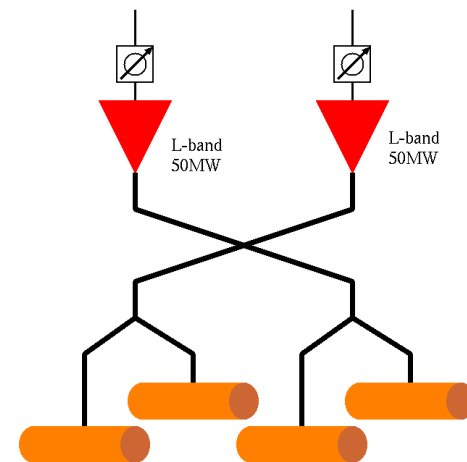


|      |        |    |
|------|--------|----|
| 最大温度 | 67.521 | °C |
| 平均温度 | 40.34  | °C |

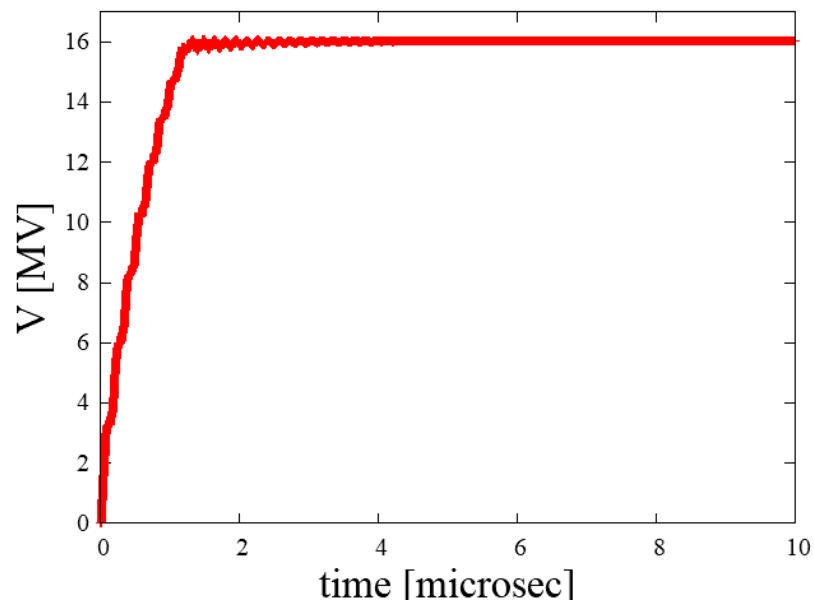


## ➤ 陽電子の安定加速

- ✓ 連続したマルチバンチパルス構造により陽電子は生成、加速されるため、ビームの作る減速場による加速電圧の変動が問題となる。
- ✓ 定在波加速管に対しては位相変調 (PM) により補償する
- ✓ 進行波型加速管に対しては、振幅変調 (AM) により補償する。
- ✓ PM、AMともに、二つのクライストロンの出力に対する位相変調により実現する。

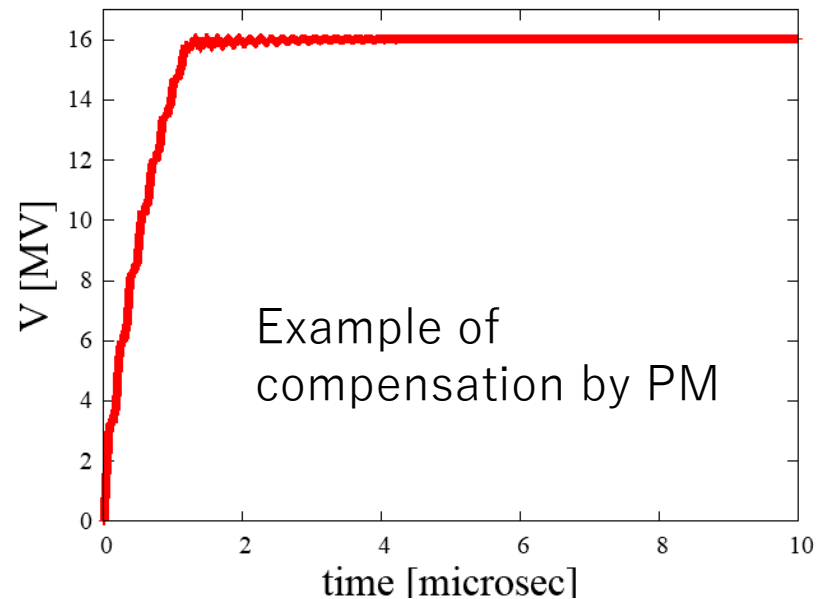
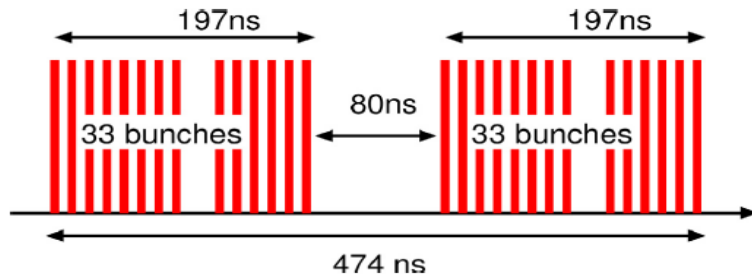
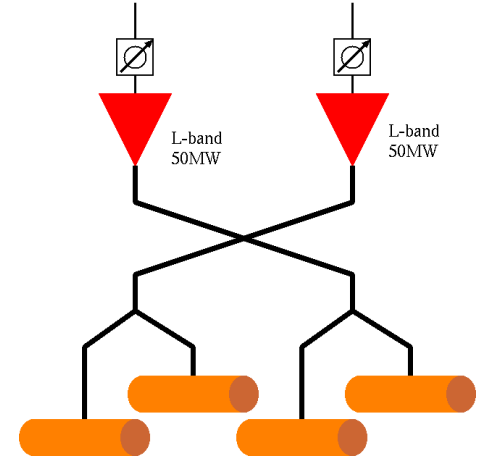


位相変調による補償の例



## ➤ Stable acceleration of positron

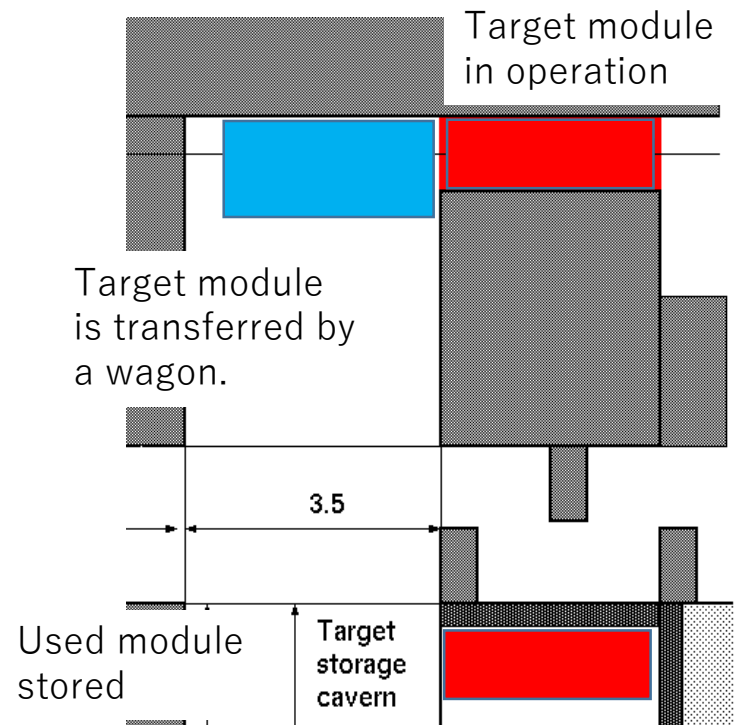
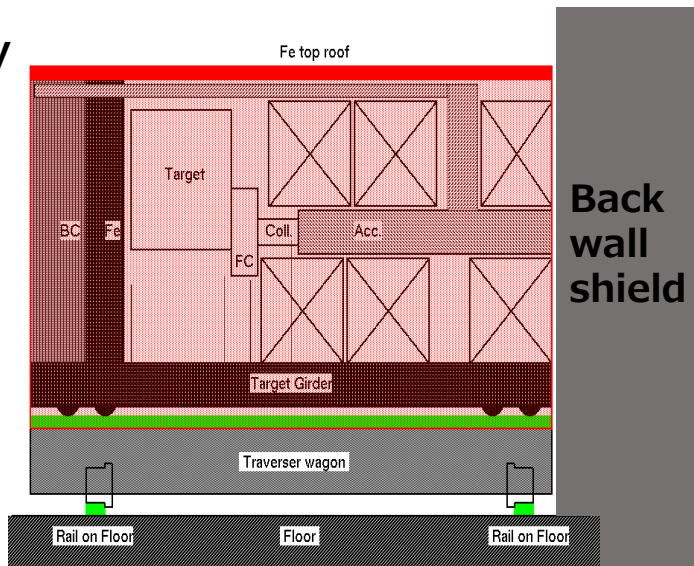
- ✓ Variation of accelerating voltage due to beam-induced field (beam loading)
- ✓ Standing-wave cavities: compensation by PM (phase modulation)
- ✓ Travelling-wave cavities: by AM (amplitude modulation)
- ✓ Phase modulation of klystron output for both PM and AM



# 標的の交換

- ▶ 標的は強く放射化される一方、放射線損傷のため2年に一回くらい交換する必要。
- ▶ 放射線を遮蔽しながら、メンテをする仕組みの概念設計を終了。
  - ✓ Maintenance while the radiation shielded
  - ✓ 一部の作業は完全リモート化
  - ✓ 作業空間は50mSv/h以下に抑制

Shield by module



# Target Exchange

- Target must be replaced every ~2 years because of radiation damage
- Conceptual design done
  - ✓ Maintenance while the radiation shielded
  - ✓ Remote control for at least some of the works
  - ✓  $< 50 \mu\text{Sv/h}$  in human workspace

**Shield by module**

