ILCの安全対策について

ILCと放射線・放射能

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構　ILC推進準備室

2020.02.02 ILC 解説セミナー

お伝えしたいポイント

- **放射化**は**ビームがぶつかる**限られた**場所**でおこります。
  - ✓ **装置の放射化**では、**放射性物質は素材内部**に留まります。
  - ✓ **ビームダンプの水**には**トリチウム**が蓄積します。
- **ビームダンプの水**を河川に**排水することはありません。**
  - ✓ この水はビームダンプ装置内で密閉循環して使います。
- 地震・停電の場合、**加速器は安全に停止します。**
  - ✓ 電源喪失による**放射能事故になる心配はありません**

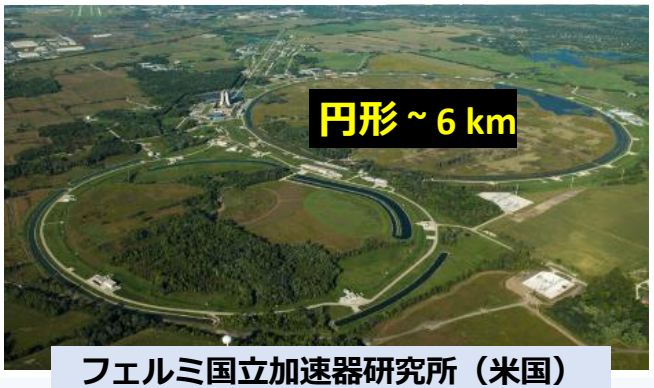
世界の主な高エネルギー加速器研究所

多くの研究所は居住区と隣接しています

SLAC国立加速器研究所（米国）

KEK: 高エネルギー加速器研究機構

ドイツ電子シンクロトロン研究所



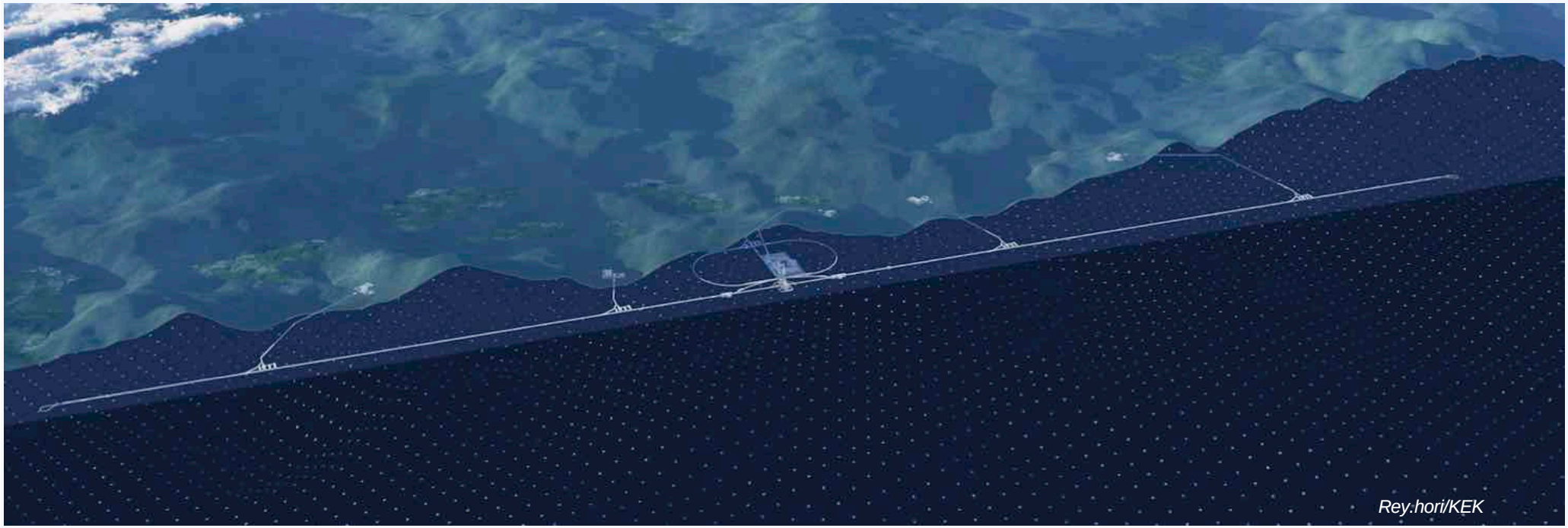
フェルミ国立加速器研究所（米国）

欧州X線自由電子レーザー
European XFEL（独）

CERN: 欧州原子核研究機構

ILCの地下トンネルと地上との関係

- **海抜約 110 メートル**の山腹を想定しています。
- 山の起伏により土被りの量（深さ）が変わります。
- 約5km間隔で地上との**アクセストンネル**を設けます。
- 衝突点には地上から**実験ホールへの立坑**を設けます。

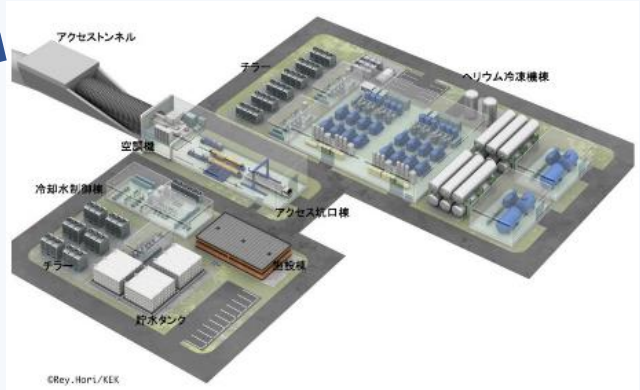


アクセストンネル施設

アクセストンネル

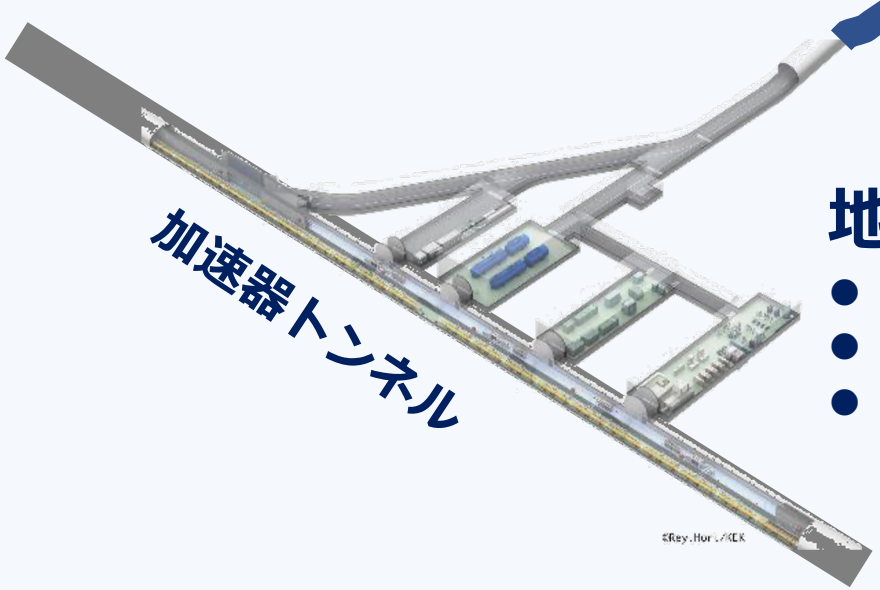
場所により長さ300 ~ 1500mと想定

- 装置搬入や作業での利用
- 電力、冷却水、ヘリウムなどの伝送ライン、換気ダクト



地上施設

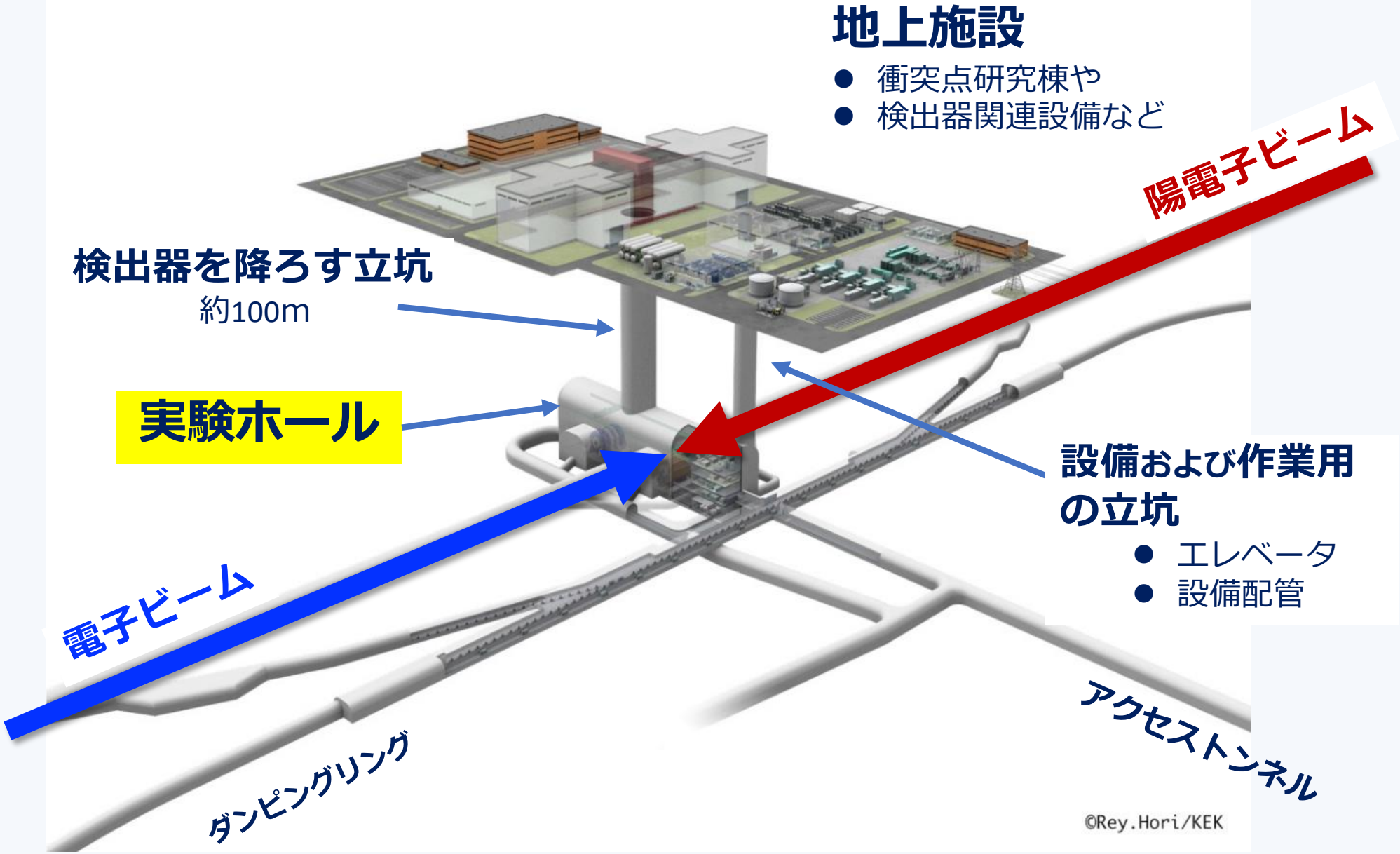
- 機器搬入設備
- 液体ヘリウム冷凍機設備
- 冷却水・空調設備など



地下設備ホール

- 液体ヘリウム冷凍機設備
- 電気設備
- 冷却水・空調設備など

衝突点施設


地上施設
● 衝突点研究棟や
● 検出器関連設備など
陽電子ビーム
検出器を降ろす立坑
約100m
実験ホール
設備および作業用の立坑
● エレベータ
● 設備配管
電子ビーム
アクセストンネル
ダンピングリング
©Rey.Hori/KEK

加速器での放射化

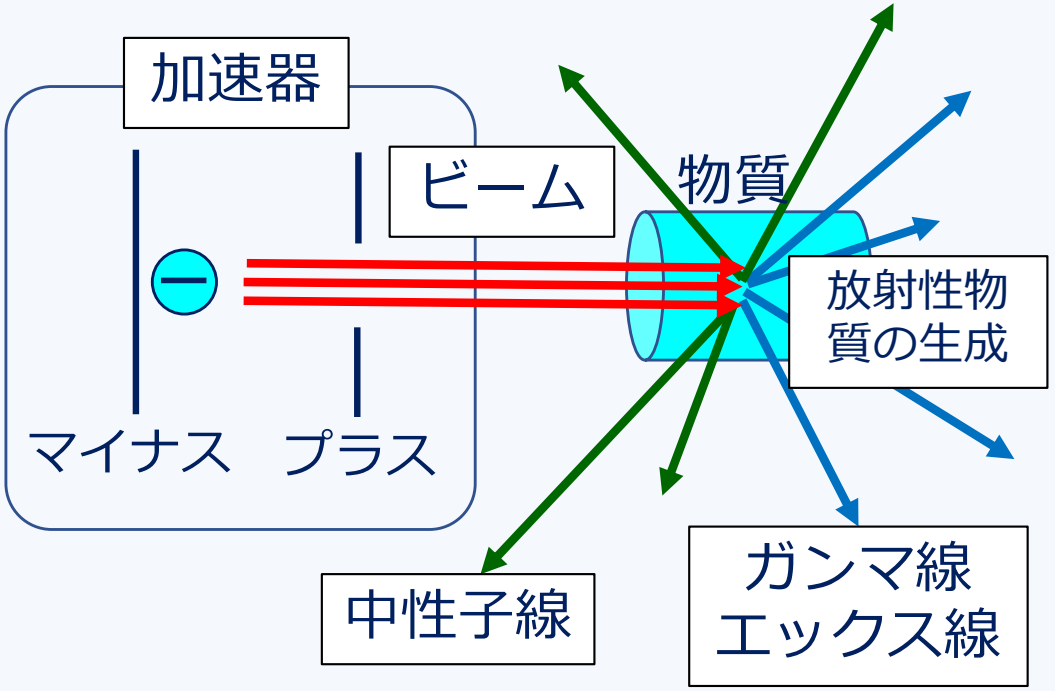
ビームが**物質**に**当たる** → **放射線**と**放射性物質**が生成

放射化

放射能を持っていなかった物質が、
放射能を持つようになる

放射化の程度：

- ビーム粒子の**種類**
- ビームの**量**
- ビームの**エネルギー**
- **物質の種類**



（加速したビームが物質に当たった場合の例）

放射化した物質(放射性物質)からは
放射線が放出されます

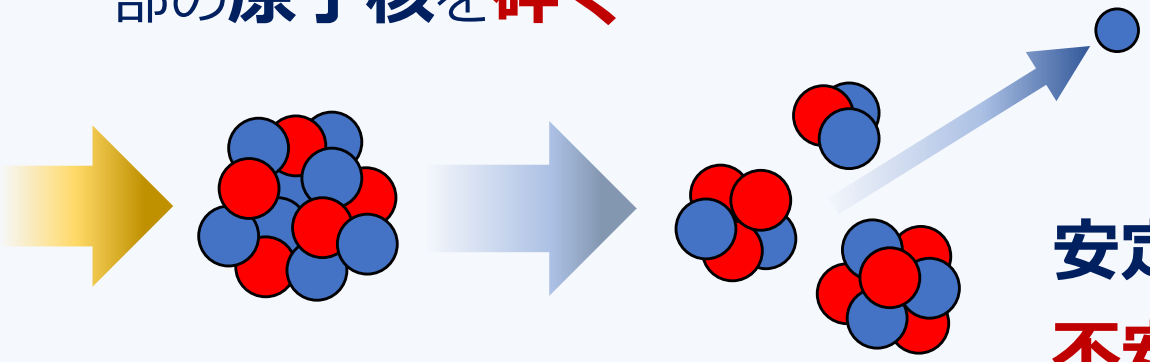
放射化のしくみ

放射化を原子核のレベルでみると、

中性子が出ることもあります。
二次的な放射化を引き起こします。

装置を構成する物質の
一部の**原子核**を**砕く**

電子ビーム
（制動放射光）



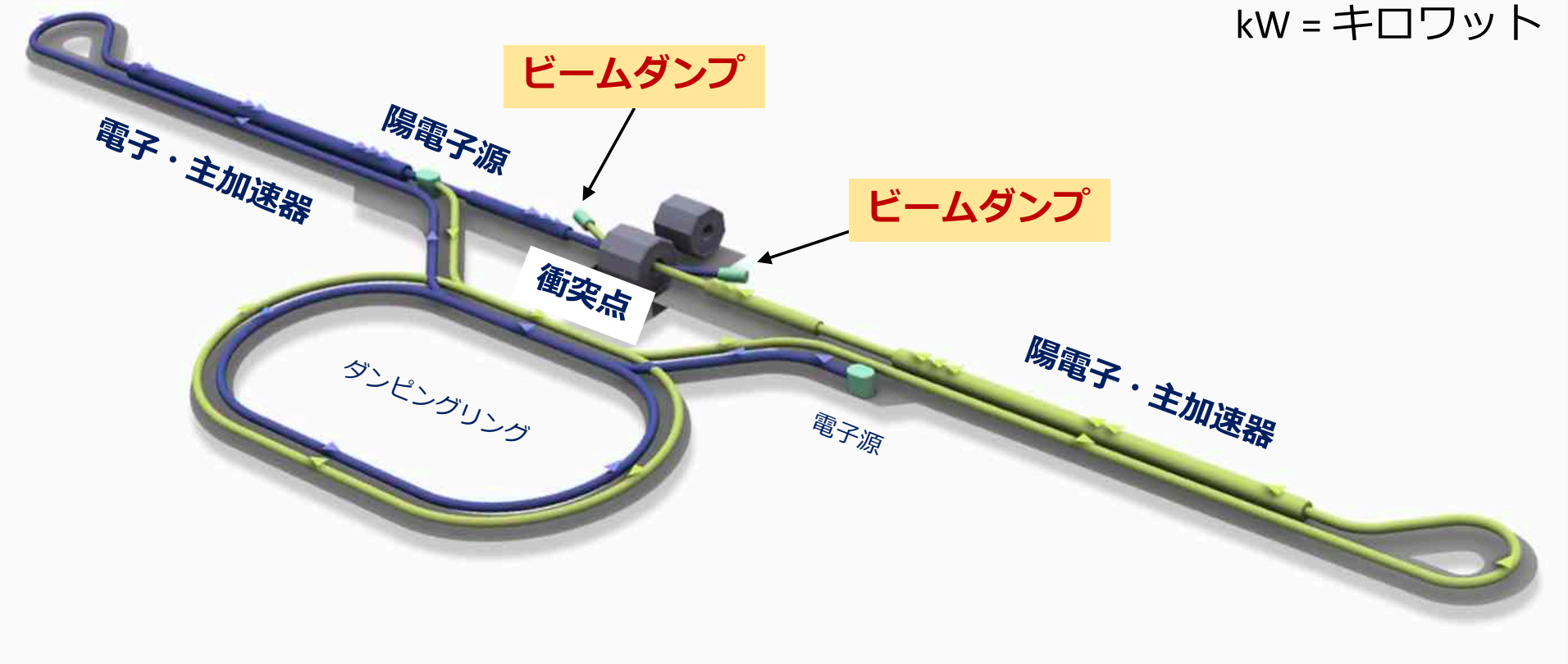
安定な原子核や
不安定な原子核
（放射性同位体）

- **砕かれる原子核より軽い原子核になります**
- **中性子を取り込んで放射化**することもあります
- 加速器装置（鉄、銅、コンクリートなど）の放射化では、より重い原子核である**セシウムやヨウ素はできません**

ILCを構成する機器と放射線・放射能

	ビーム損失パワー
① ビームダンプ：ビーム吸収による放射化	**(2600 kW x2)**
② 陽電子源：ターゲットの放射化	(12 kW)
③ 主加速器：ビームを加速する際の放射線	(1 kW x2)
④ 衝突点：衝突散乱により散らばる粒子	(0.1 kW以下)

kW = キロワット



ビームダンプ

- **ビームを安全に止める**装置です

  放射性物質が最も多くできる場所です

- **水**で**ビーム**を**吸収**します

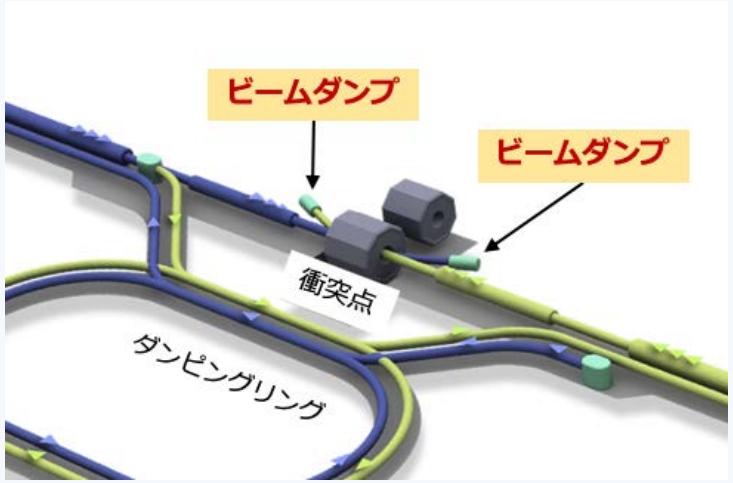
  20年間休み無くビームを入射し続けた場合、
  ビームダンプ2ヶ所の合計で、

  ① およそ**100トンの水**に、

  ② **最大100兆ベクレルのトリチウム**が蓄積すると評価しています

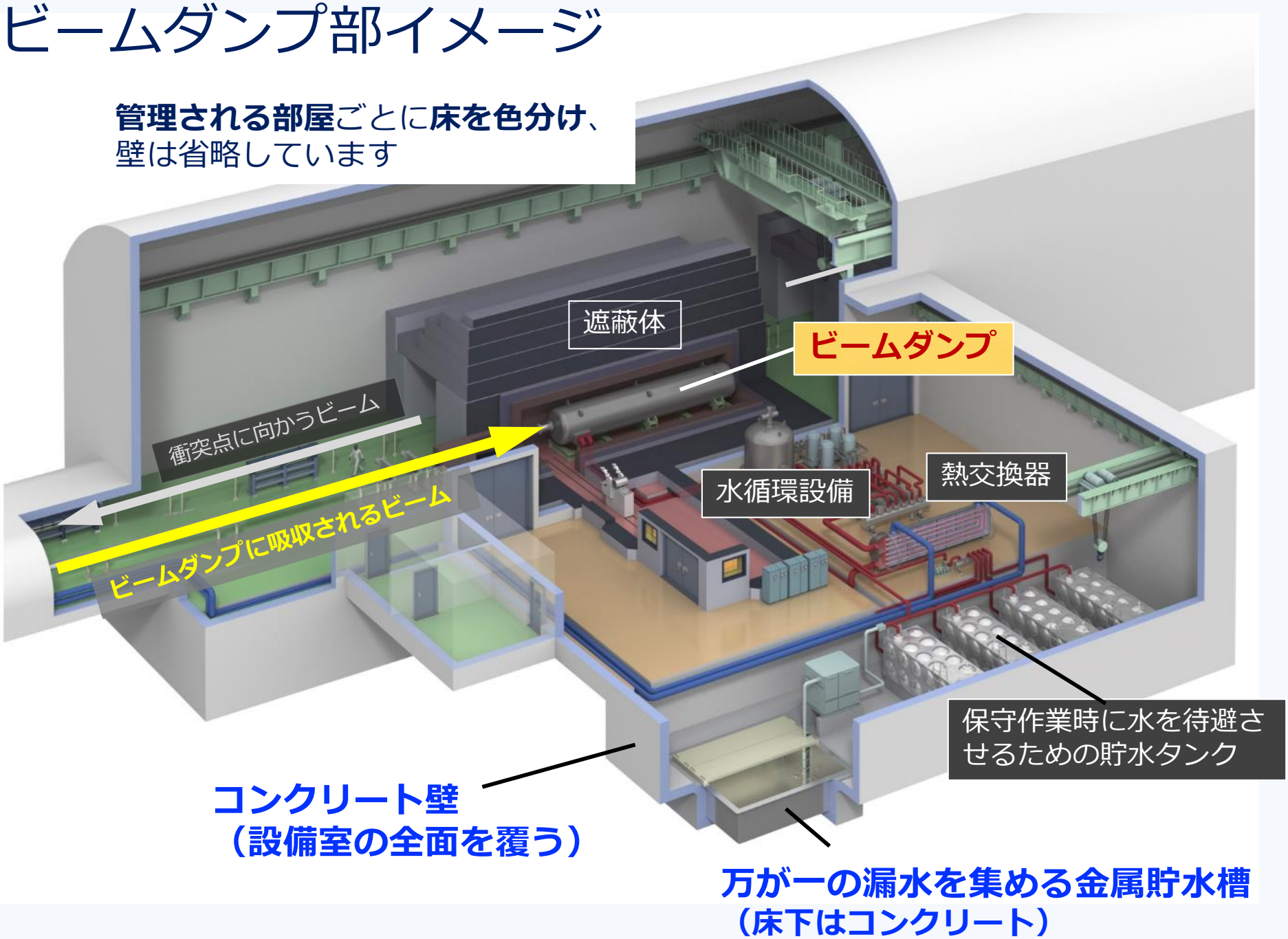
- この水は**管理された装置室**の中で、密閉された**循環水**として運用します。

- 保守作業などでも**排水しません**



ビームダンプ部イメージ

管理される部屋ごとに**床を色分け**、
壁は省略しています



ビームダンプ水の取り扱い

- **ビームダンプ水は排水しません。**
- 20年間休み無くILCを運転した場合、**約100トン**のビームダンプ水に**最大で100兆ベクレル**(0.3g)の**トリチウム**が蓄積すると見積もっています。

  これを「排水濃度限度(60Bq/cc)」以下に希釈しようとすると、16,000倍以上の水（160万トン以上）が必要で、そもそも現実的ではありません。

- **管理された装置室の中で循環して運用します。水が増え続けるようなことはありません。**
- 実験終了後でも**十分管理できる量**であり、保管容器で保持してトリチウムが減るのを待ちます

  国が計画している「研究施設等廃棄物の埋設事業」への引き渡しなどが考えられます

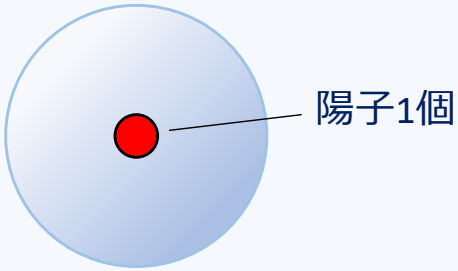
トリチウム（三重水素）とは

水素の同位体（陽子は1個）**化学的性質は水素と同じ**

水素 (H)

安定

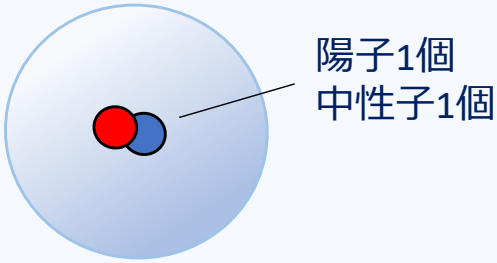
自然界では99%以上



重水素 (D)

安定

自然界では0.02%

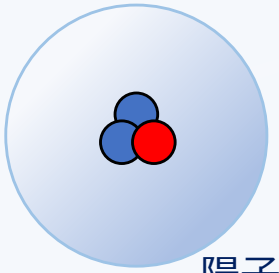


トリチウム (T)

不安定

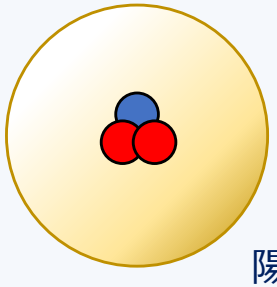
自然界にもわずかに存在

宇宙線と大気の相互作用で常に作られている



ベータ壊変
半減期12.3年

エネルギーの低いベータ線（電子）を放出



ヘリウム3

安定

トリチウムの放射線と外部被曝

	トリチウム	セシウム 134/137
性質	主に水として	低融点、水溶性、飛散しやすい
放出する放射線	**① エネルギーの低いベータ線（電子）** ● 最大飛程は空気中で5mm、水中ではわずか0.006mmです。**食品用ラップや皮膚も透過できません。** ● **容器に入っていれば、放射線が抜け出てくることはありません。**	① ベータ線（電子） **② ガンマ線** （X線よりエネルギーが高い） **人体を容易に透過します**
外部被ばく （体の外にある放射能の影響）	**被ばくの影響はありません**	**被ばくの影響があります。**

（補足）ベクレルは放射能が1秒間に壊変する数であり、人体への影響の強弱ではありません。**トリチウムの影響はベクレルの大きさで考えるものではありません。**

トリチウムと内部被曝

- **トリチウムの化学的性質は水素と同じです**
- **水や有機物の水素と置き換わることがあります**

体内に水として取り込まれたトリチウムは、いずれ排出されます。（生物学的半減期は10日程）

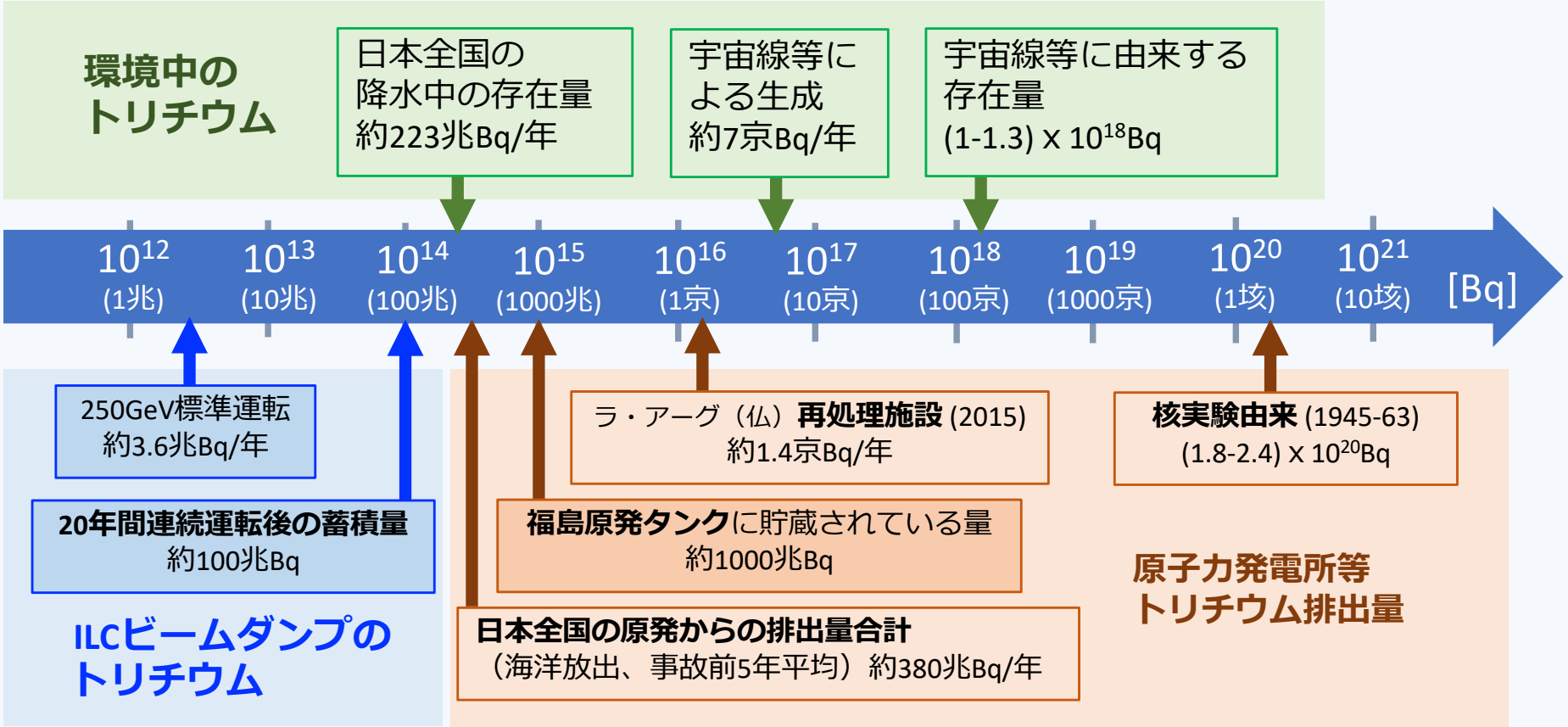
① 水として排出される分の生物学的半減期は 6～18日です。

② 数%のトリチウムは、体を構成する有機物に取り込まれ(有機結合型トリチウム)、代謝により入れ替わるまで体内に留まります。 その生物学的半減期は40日程度、長いもので1年ほどとされています。

- **ビームダンプ水をトンネル外部に漏らさない設備設計を行います**

環境中及び人工由来トリチウム

- **トリチウムは**宇宙線等により**自然界でも生成されています**
- 日本全国の降水量中の存在量は年間223兆ベクレル程度です。
- ILCのビームダンプで生成されるトリチウムの量は年間3.6兆ベクレル程度で、自然由来の降水量の1.6%程度に相当します。



出典元：トリチウムの性質等について(案) （参考資料）多核種除去設備等処理水の取扱いに 関する小委員会 事務局
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committtee/takakusyu/pdf/008_02_02.pdf　に**ILC分を追記**

加速器の安全装置

装置の健全性を監視
電磁石、高周波装置、ビームダンプなど

- **状態監視**（温度、電流、電圧、真空度、冷却水流量 ...）
- **操作設定値の確認**（誤操作対策：組込み回路、計算機 ...）

ビームの監視

- **ビーム強度**、**ビーム軌道**、**エネルギー** ...

放射線量の監視

- 様々な場所に**放射線モニター**を設置

立ち入りの管理

- **入退域の管理**、非常停止スイッチ、ドアセンサーなど

異常レベルに応じて**自動でビーム運転停止**となるように**安全装置**が組み込まれます。

地震・停電の対応

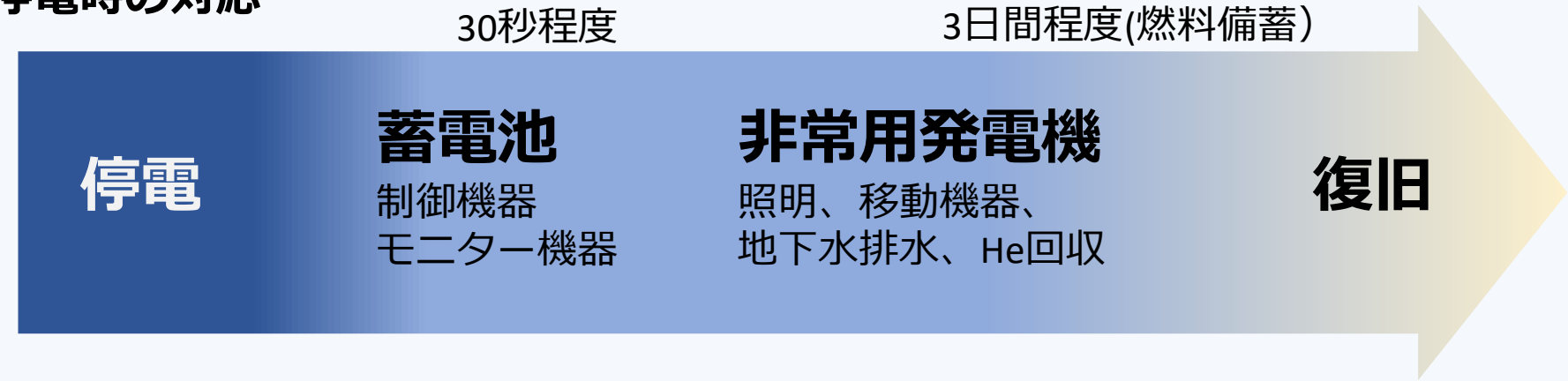
■ 安全システムによりビームが停止します

新たな放射化は起こりません。また、継続的な冷却を必要とするような放射性物質もありません。電源喪失による**放射能事故になる心配はありません**

■ 機器の耐震設計を追求します

地下100mの揺れは地表の1/2～1/4程度となり、より安全性が高まります

停電時の対応



まとめ

- **放射化**は**ビームがぶつかる**限られた**場所**でおこります。
  - ✓ **装置の放射化**では、**放射性物質は素材内部**に留まります。
  - ✓ **ビームダンプの水**には**トリチウム**が蓄積します。
- **ビームダンプの水**を河川に**排水することはありません。**
  - ✓ この水はビームダンプ装置内で密閉循環して使います。
- 地震・停電の場合、**加速器は安全に停止します。**
  - ✓ 電源喪失による**放射能事故になる心配はありません**

ご清聴ありがとうございました

参考資料

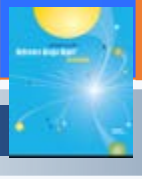
1. 国際協力によるILC研究開発
2. リニアコライダー推進の国際組織
3. 放射線発生装置としての加速器
4. ILC加速器システム
5. 陽電子源
6. 主加速器
7. 衝突点
8. ILC主ビームダンプの設計
9. ILCのビーム仕様とビームダンプに必要な能力
10. 主な高エネルギー加速器のビームダンプ
11. 要求仕様に応じた様々なビームダンプ形式
12. ビームダンプ水中にできる放射性物質
13. ビームダンプの水の管理と拡散防止対策
14. ビームダンプの水100トンはどの位の量ですか？
15. 冷却水システムの概要
16. 電磁石や加速装置の冷却水
17. 空気中にできる放射性物質
18. 換気システムの概要
19. 地下水（自然湧水）の取り扱い
20. 地下水（自然湧水）量の想定
21. 地震の影響について
22. 実験終了後の放射化物の取り扱い
23. 研究施設等廃棄物の埋設事業（1）
24. 研究施設等廃棄物の埋設事業（2）
25. 研究施設等廃棄物の埋設事業（3）
26. 放射線・放射能に係わる法規制
27. トリチウムの影響について
28. トリチウムの影響（内部被ばく）
29. ILCと原子力施設の比較
30. 国際熱核融合実験炉ITERのトリチウム
31. 文部科学省「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議」における委託調査
32. 日本学術会議での審議-ビームダンプ関係
33. 「ILCプロジェクト実施に関する提言」
34. 「ILCプロジェクト実施に関する提言」：ビームダンプに関する記載
35. ILCと世界最大の加速器LHC
36. 大型加速器システム：CERN-LHC
37. LHC加速器トンネルにおける非常時・緊急安全対応
38. J-PARCの被ばく事故
39. 国内の放射線利用と法規制
40. FCCについて
41. ILCと同じ超伝導加速技術に基づく電子加速器

国際協力によるILC研究開発

リニアコライダーの研究は1980年代から開始された

2004 | 2006 | ‘07 | ‘08 | ‘09 | ‘10 | ‘11 | ‘12 | ‘13 | ‘14 | ‘15 | ‘16 | ‘17 | ‘18 | ‘19 | ‘20

RDR



国際設計組織 ILC-GDE

TDR

リニアコライダー国際組織 LCC

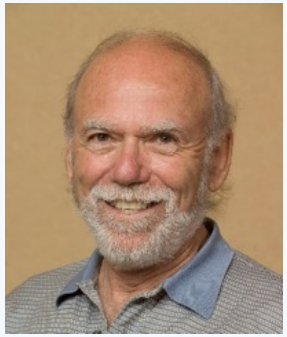
概念設計報告書

技術設計報告書

ILC技術設計期間

ILCでは世界統一の設計を行い、それぞれ国際協力の下で物品を持ち寄ることを想定している。
GDEはバリー・バリッシュ氏、LCCはリン・エバンス氏、2人の卓越したリーダーシップの下で国際協力での研究開発が進む。

TDR:
参加国:49
参加機関:392
参加者:>2,400



バリー・バリッシュ
GDEディレクターとしてRDRおよびTDRをまとめる。**2017年に重力波観測でノーベル物理学賞受賞**

リン・エバンス（現LCCディレクター）
元LHCプロジェクトマネージャー。
LHCの完成にリーダーシップを発揮した。

最近の大型加速器建設

LHC

European XFEL

LCLS-II

リニアコライダー推進の国際組織

ICFA（International Committee for Future Accelerators）
将来加速器国際委員会

Linear Collider Board（LCB）
（リニアコライダー国際推進委員会）
中田達也

LCC
Linear Collider Collaboration
リニアコライダーコラボレーション

ディレクター
Lyn Evans
リン・エバンス

副ディレクター
村山斉

ILC 研究Gリーダー
道園真一郎

CLIC研究Gリーダー
Steinar Stapnes
スタイナー・スタップネス

物理・測定器Gリーダー
Jim Brau
ジム・ブラウ

放射線発生装置としての加速器

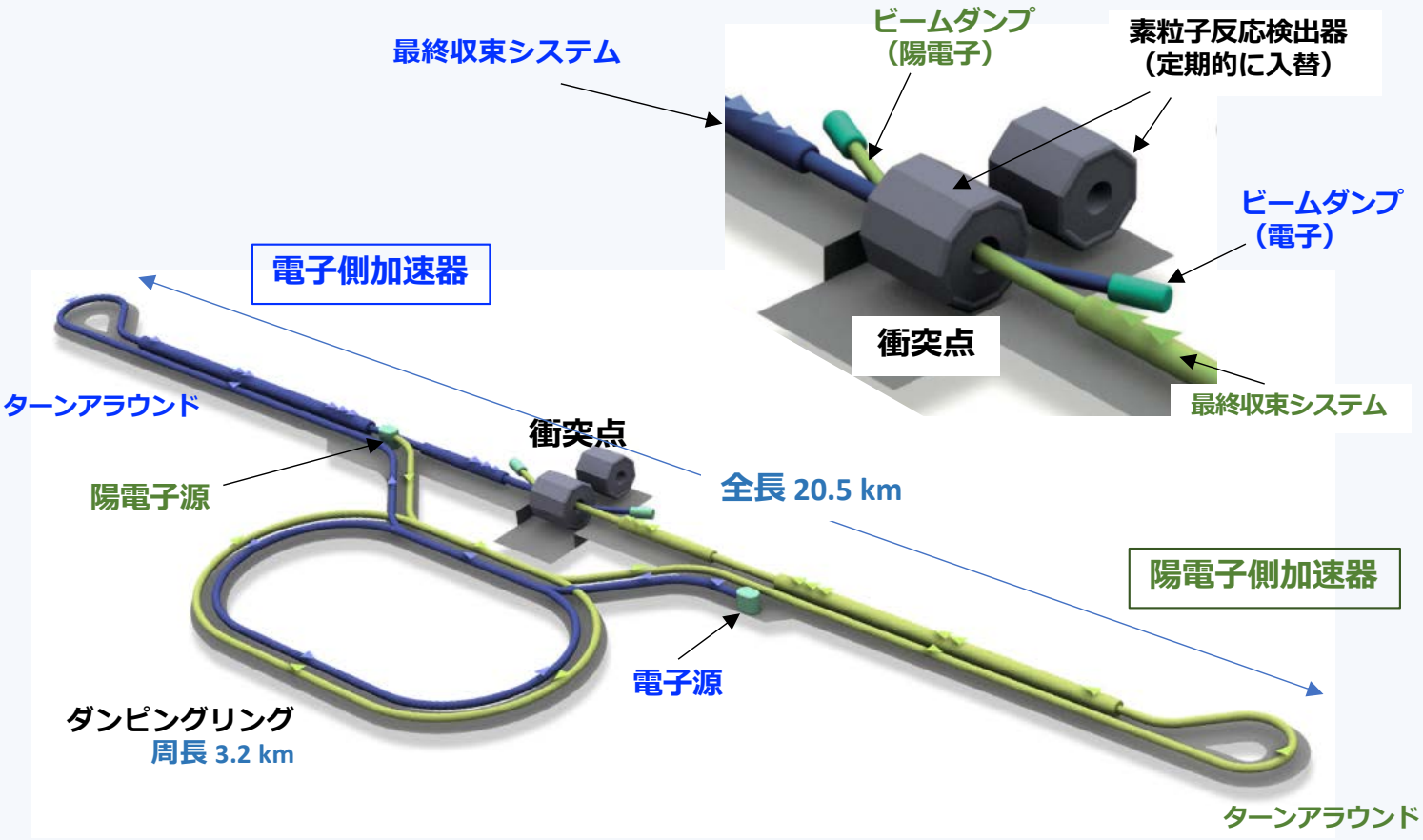
- 加速器は、電子や陽子など荷電粒子を加速する装置です。
- 加速されてエネルギーが高くなった粒子は放射線です。従って、**加速器**は**放射線発生装置**であり、**「放射性同位元素等の規制に関する法律」**＊の下で管理されています。

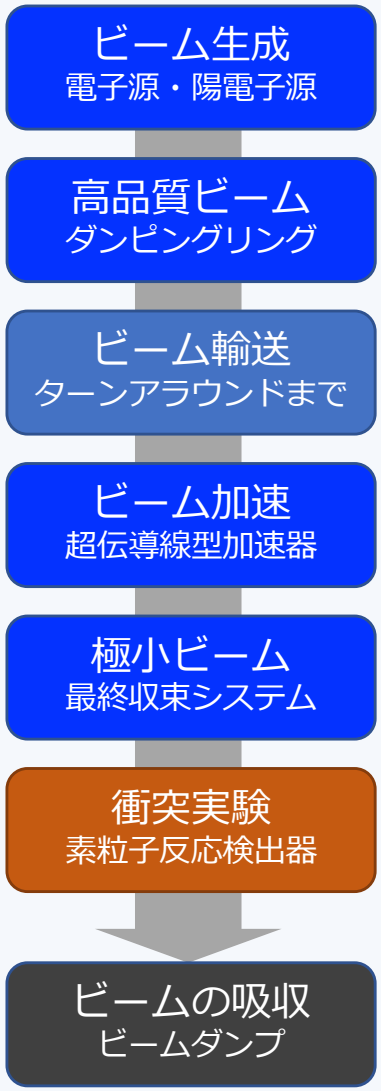
＊2019年9月1日に「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」を改名

- 病院で放射線治療に用いられている**医療用加速器**、物性研究に利用される**放射光施設**、**ILCなど素粒子実験用大型加速器**などがあります。

- 一方、大量の放射性物質を扱う**核燃料加工工場**や原子力発電所などの**原子炉施設**は、**「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（原子炉等規制法）」**の下で管理されています。

ILC加速器システム

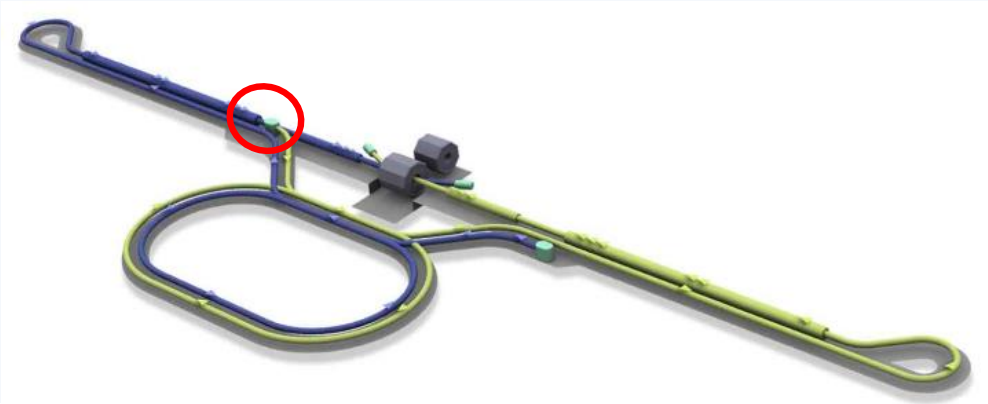




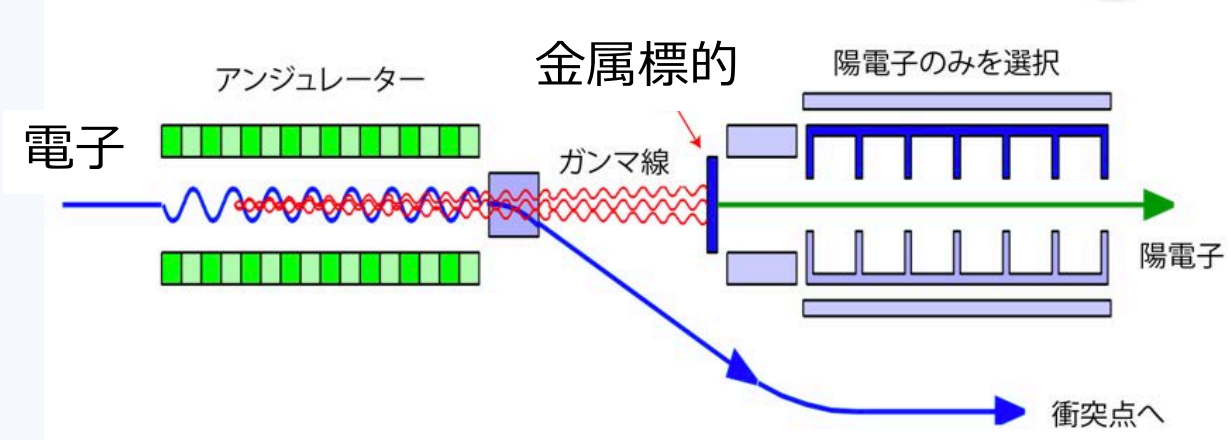
- ILCはパルス運転（ビーム繰り返し 5 Hz、ビーム長さ 0.7 ms, バンチ数 1312）
- ビームモニター等で異常を検出した場合はただちにビームが停止します。
- 加速器は放射線発生装置として原子力規制委員会に申請され、安全系を含めて審議されます。完成時に放射線安全に対する施設検査を受け合格してから運用されます。定期的に運用状態での検査も行われます。

陽電子源

- 金属標的に、ガンマ線、または電子ビームを当てて自然には存在しない**「陽電子」を生成します**



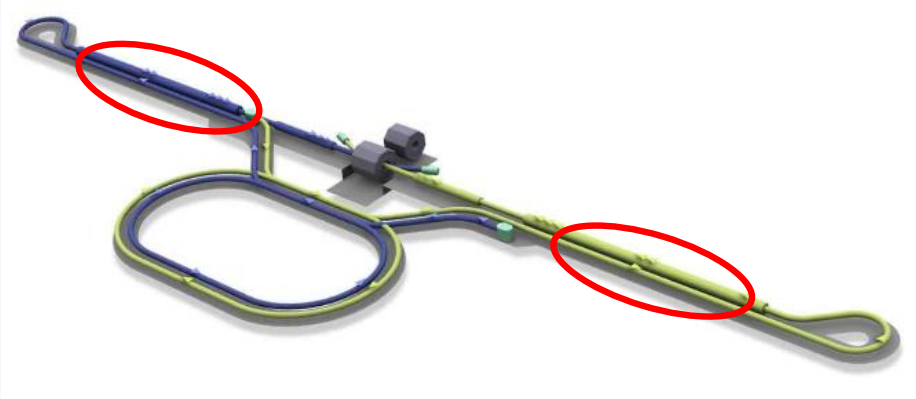
- 放射化がおこるので十分な厚みの遮蔽体で覆います

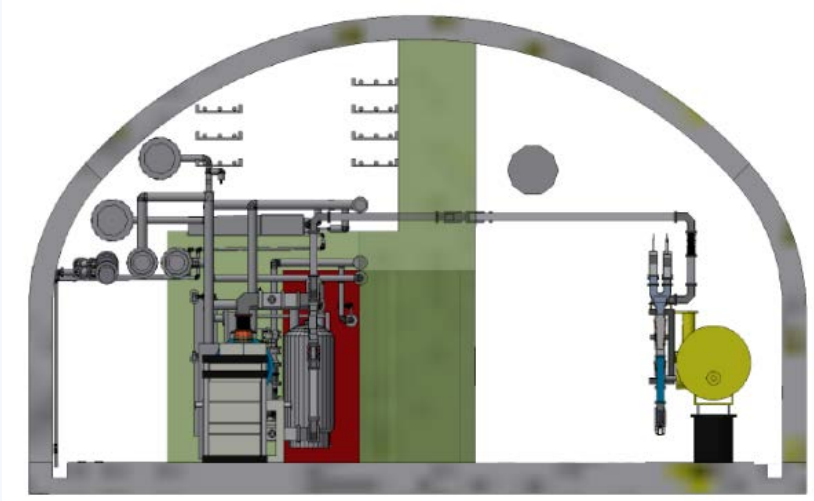


- 熱による損傷を防ぐため、金属標的は運転中は常に冷却します
- 金属標的は真空容器の中に収められます。**万が一、標的が損傷しても放射性物質が容器の外に飛散することはありません**

主加速器

- 標高110m付近に設置された幅9.5mのかまぼこ形トンネルで、中央の隔壁で2つの部分に分離します
- 放射線管理区域として設定され、運転中は立ち入り禁止です
- 加速ビームの損失はありませんが、電界放出電子による損失（加速ビームパワーの1/1000以下）があります
- 空気の放射化の対策を行います
- トンネル外部を流れる地下水がトンネル内に入らないようにします

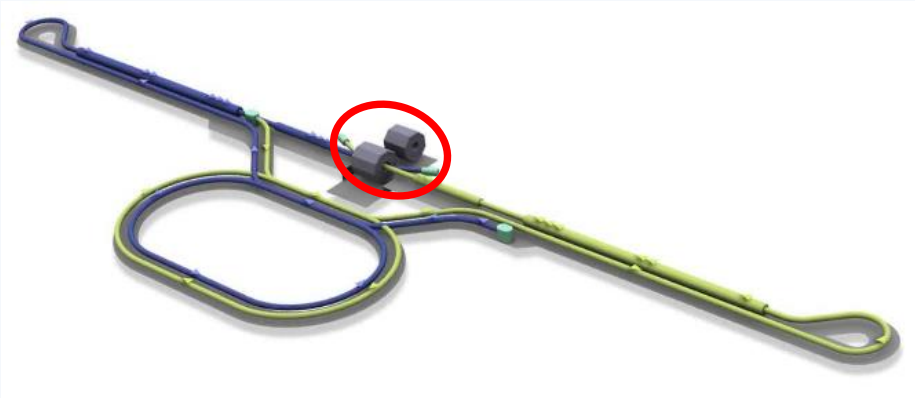


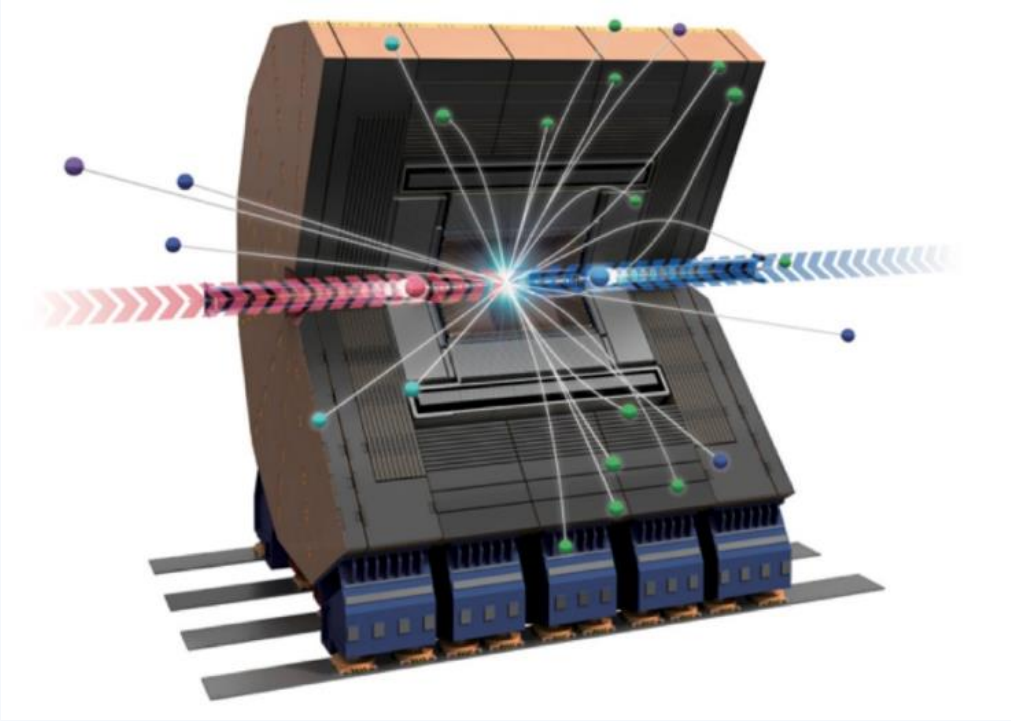


電源室　　隔壁　　加速器室

衝突点

- ILCの中央部、地下約100mの実験ホール内にあります
- 主加速器で加速した、電子ビームと陽電子ビームが衝突します
- 衝突点の周囲は何層ものセンサーと総計3.6m厚の鉄などでできた検出器で囲まれています
- 衝突により生成した放射線は、検出器により吸収されます
- 衝突する割合はとても低いです（ヒッグス粒子は4分に1個程度生成されます）



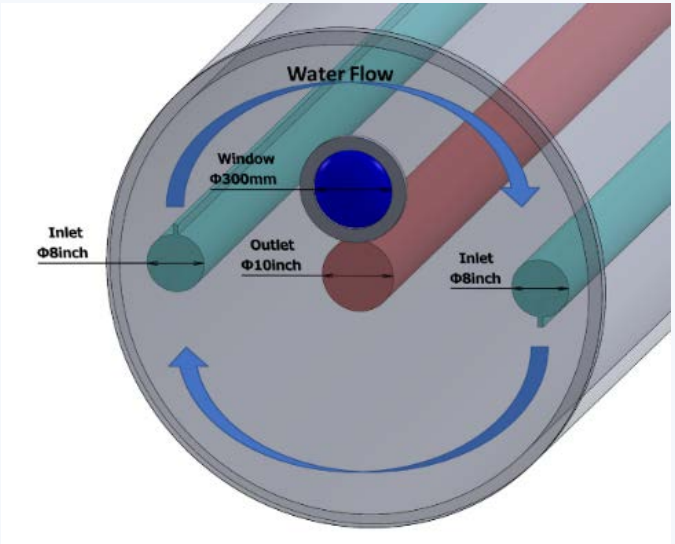


ILC主ビームダンプの設計

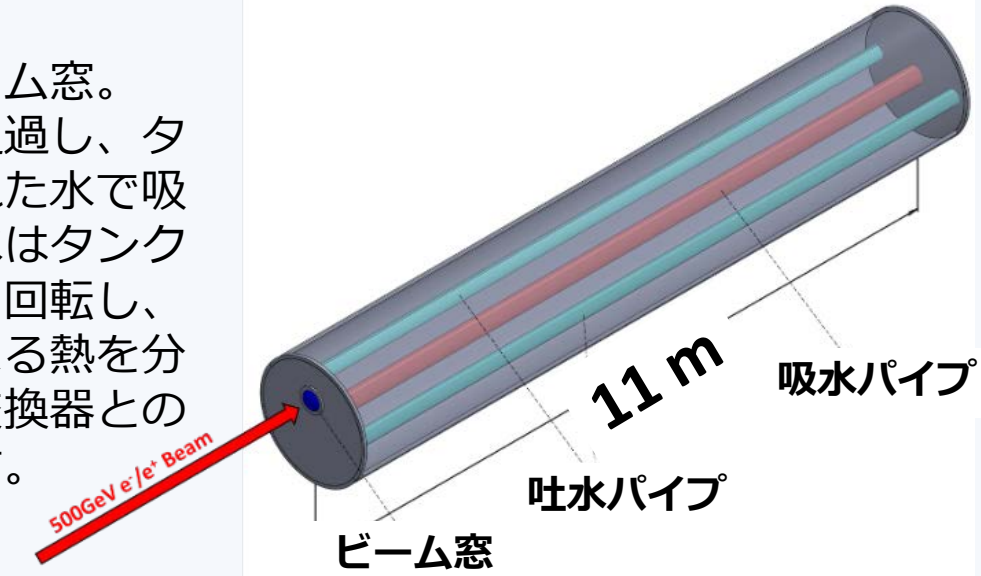
- ILC主ビームダンプの基本設計は、水ダンプの実績をもつ米国SLAC研究所を中心とする海外の分担グループが進め、その結果を15ページの論文として報告しました。

P. Satyamurthy, et.al., NIM A 679 (2012) p67-81.

- その後、KEKはILCの日本誘致を想定し責任を持って対応すべく、これらの設計の再評価、強度計算や放射線対策の確認、信頼性向上のための更なる対応の検討を進めています。
- TDRで設計を行ったSLAC研究所、現在も水ダンプを運用している米国ジェファーソン研究所(JLAB)、LHCの大型ビームダンプを持つCERN研究所などと連携しながら250GeVのILCに最適かつ安全となる設計検討を進めています。



青い部分がビーム窓。ビームは窓を通過し、タンクに満たされた水で吸収されます。水はタンク内で渦を巻いて回転し、ビーム吸収による熱を分散、外部の熱交換器との間を循環します。



ILCのビーム仕様とビームダンプに必要な能力

	TDR		ILC
衝突エネルギー（GeV）	**500**	**TDR当時、将来の可能性を踏まえた最大値として 1000**	**250**
ビームエネルギー(GeV)	250	500	125
繰返し (Hz)	5	4	5
パルス内バンチ数	1312	2450	1312
バンチ間隔 (nsec)	554	366	554
パルス長 (msec)	0.727	0.897	0.727
バンチあたり粒子数	2×10^{10} (3.2nC)	1.74×10^{10} (2.79nC)	2×10^{10} (3.2nC)
パルス当り電荷 (μC)	4.20	6.83	4.20
パルス内電流 (mA)	5.78	7.61	5.78
パルスエネルギー (MJ)	1.05	3.41	0.53
平均電力 (MW)	**5.25**	**13.7**	**2.63**

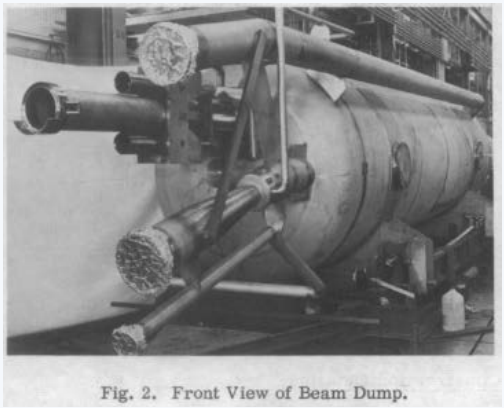
ビームダンプ設計：20%のマージン → **17 MW**

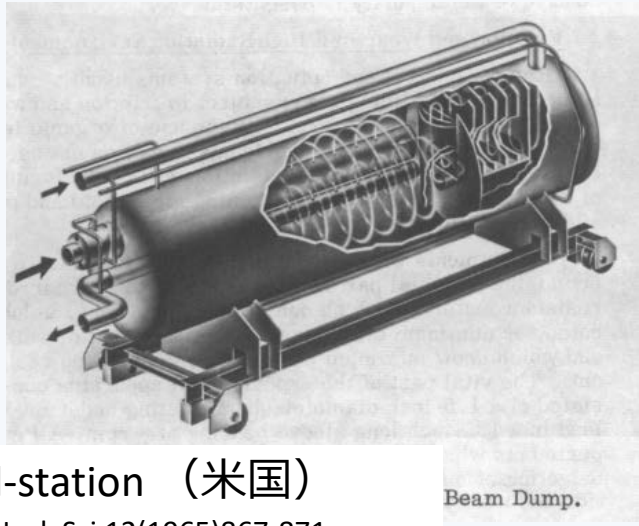
主な高エネルギー加速器のビームダンプ

＃ビームダンプ1基あたりの比較

施設	粒子	パルスあたりのビームエネルギー	想定ビームパワー	ビーム吸収体	補足
ILC	**電子/陽電子**	**530 kJ**	**2.6 MW**	**水**	**• 連続 • 17MW(1TeV)で設計したビームダンプを使用する**
SLAC End-station	電子		2.2 MW	**水**	• 連続 • 実績は加速器最大出力の 750 kW
JLAB CEBAF	電子		1 MW	**水** + アルミニウム	• 連続 • 実績は 500 kW（平均）
European XFEL	電子	30 kJ	0.3 MW	グラファイト	• 連続
SLAC SL-30	電子		0.66 MW	アルミニウム	• 連続 8 日間
SuperKEKB	電子	182 kJ		鉄	• ビームアボート時のみ
LHC	陽子	350,000 kJ		グラファイト	• ビームアボート時のみ
J-PARC MLF	陽子		1 MW	水銀	• 連続
JPARC ニュートリノ施設	陽子		0.75 MW	グラファイト	• 連続 • 実績は 480 kW (2017)
ESS	陽子		5 MW	タングステン	• 連続 • 建設中

要求仕様に応じた様々なビームダンプ形式

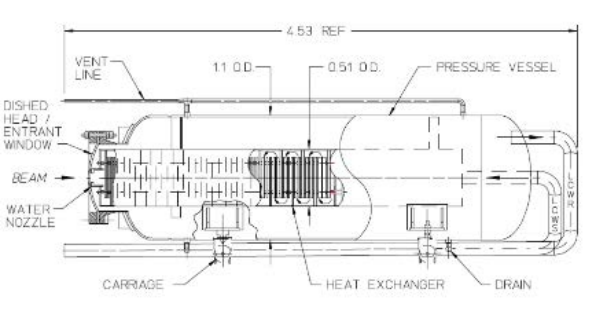




SLAC End-station （米国）

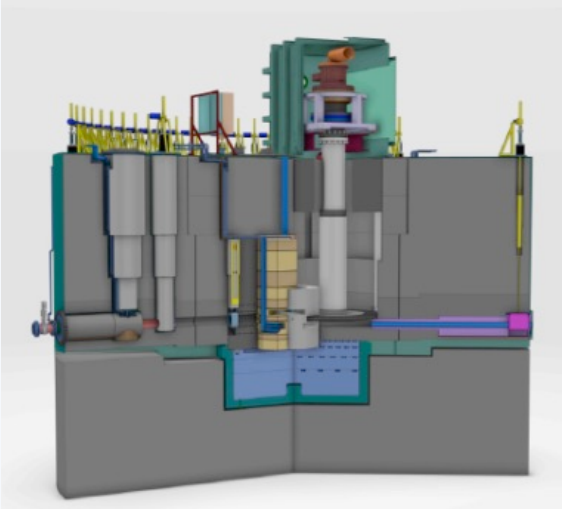
IEEE Trans. Nucl. Sci.12(1965)867-871

J-PARC ニュートリノ施設
ビームダンプ（日本）



JLAB CEBAF（米国）

CERN LHC（スイス）



ESS 5MWターゲット（スウェーデン）

DOI: 10.1109/ANIMMA.2013.6728029

ビームダンプ水中にできる放射性物質

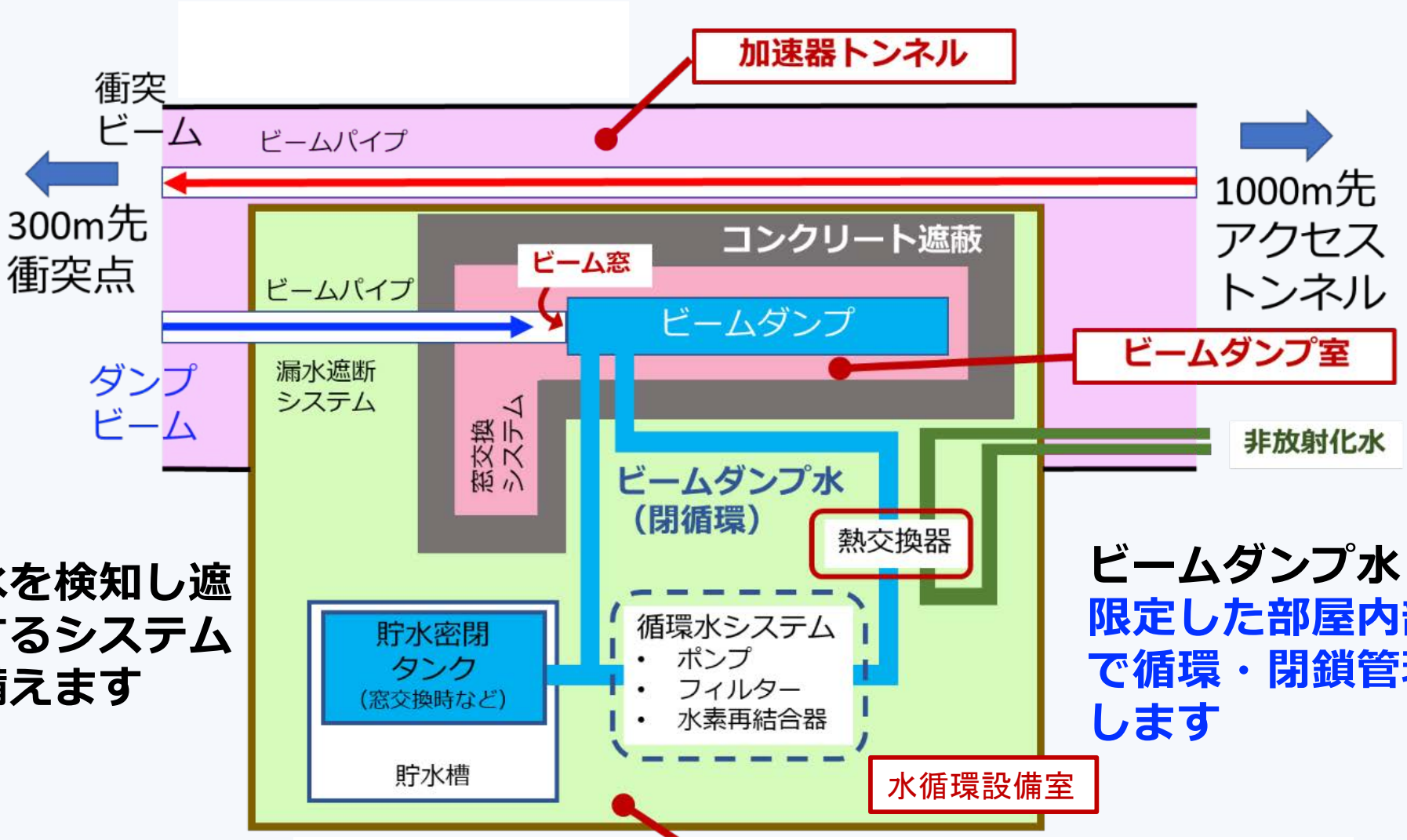
- ビームダンプ中にできる放射性物質は、酸素が壊れてできます。作られる放射性物質は、酸素よりも小さなものだけです
- ビームダンプ中にできる放射性物質は、右表の通りです
- 炭素11 、窒素13、酸素15は半減期が短く、運転終了後に減衰します
- ベリリウム7はイオン交換樹脂に吸着して除去します
- **トリチウムはビームダンプ水中に残るため、厳重に管理します**

核種	半減期
炭素11	20.34分
窒素13	9.96分
酸素15	123秒
ベリリウム7	53日
トリチウム	12.3年

トリチウムの特徴

- β壊変:最大 18.6 keVの電子を放出
- 最大飛程：空気中 5 mm 水中 0.006 mm
- 外部被曝は無視できる
- 内部被曝に留意する
- 水(HTO)またはガス(HT)として存在

ビームダンプの水の管理と拡散防止対策



漏水を検知し遮断するシステムを備えます

ビームダンプ水：
限定した部屋内部で循環・閉鎖管理します

室内の漏水を**回収する仕組み**や**貯水槽**を備えて
部屋の外への拡散を防止します

ビームダンプの水100トンはどの位の量ですか？

石油貨物タンク車2台程度の水です。

- **ビームダンプ1箇所あたりの水は、約50トンです。**
- **電子用、陽電子用、2箇所の合計で約100トンになります。**
- 実験終了後も**維持管理が可能な規模**の水量です。

50トンの水は、

- 幅10m x 横5m x 深さ1m の容積
- 例えば、石油貨物タンク車1台程度

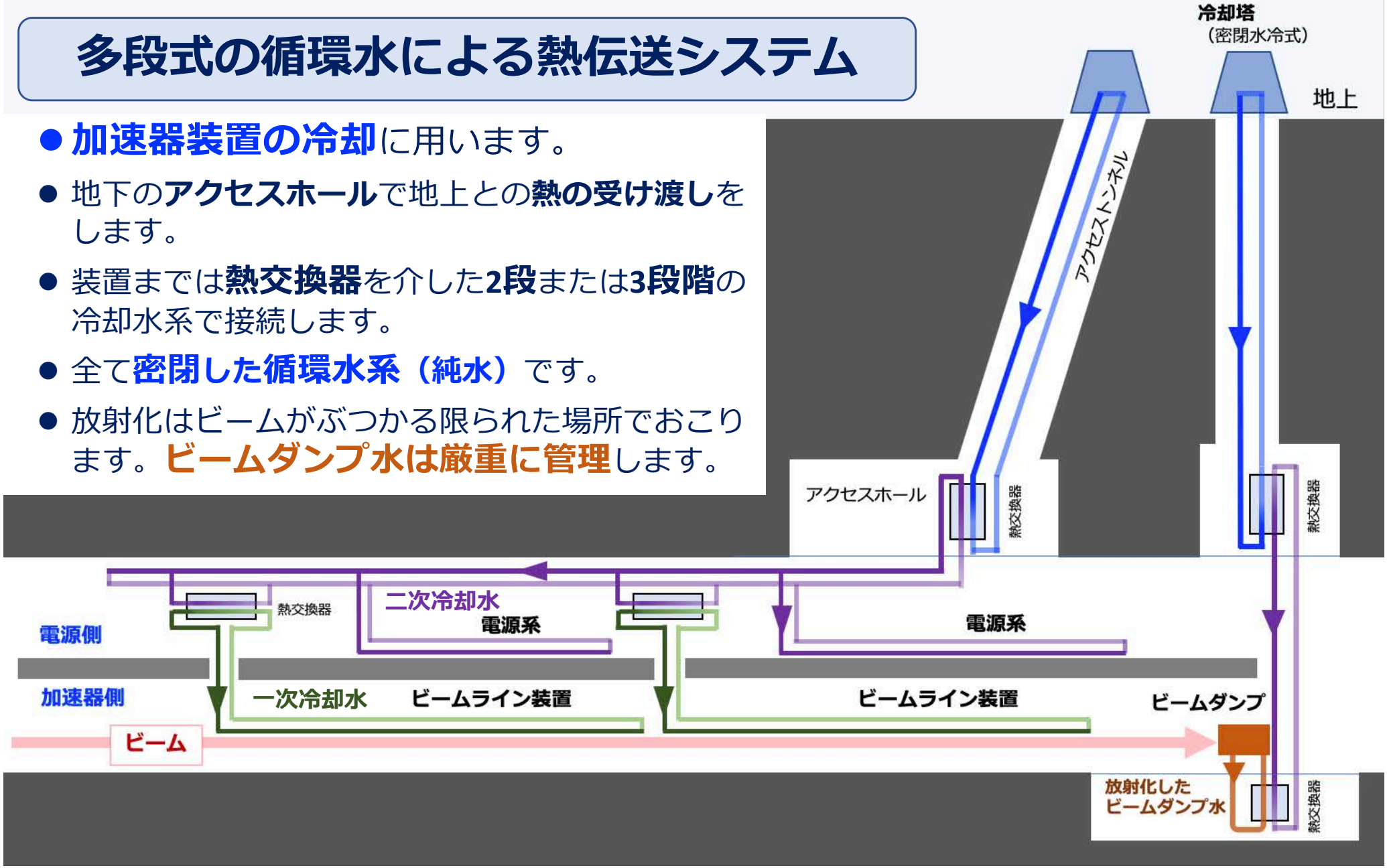
JR貨物タキ1000形貨車
実容積 61.6 m^3

ILC全体でこれが2台分あるイメージです。

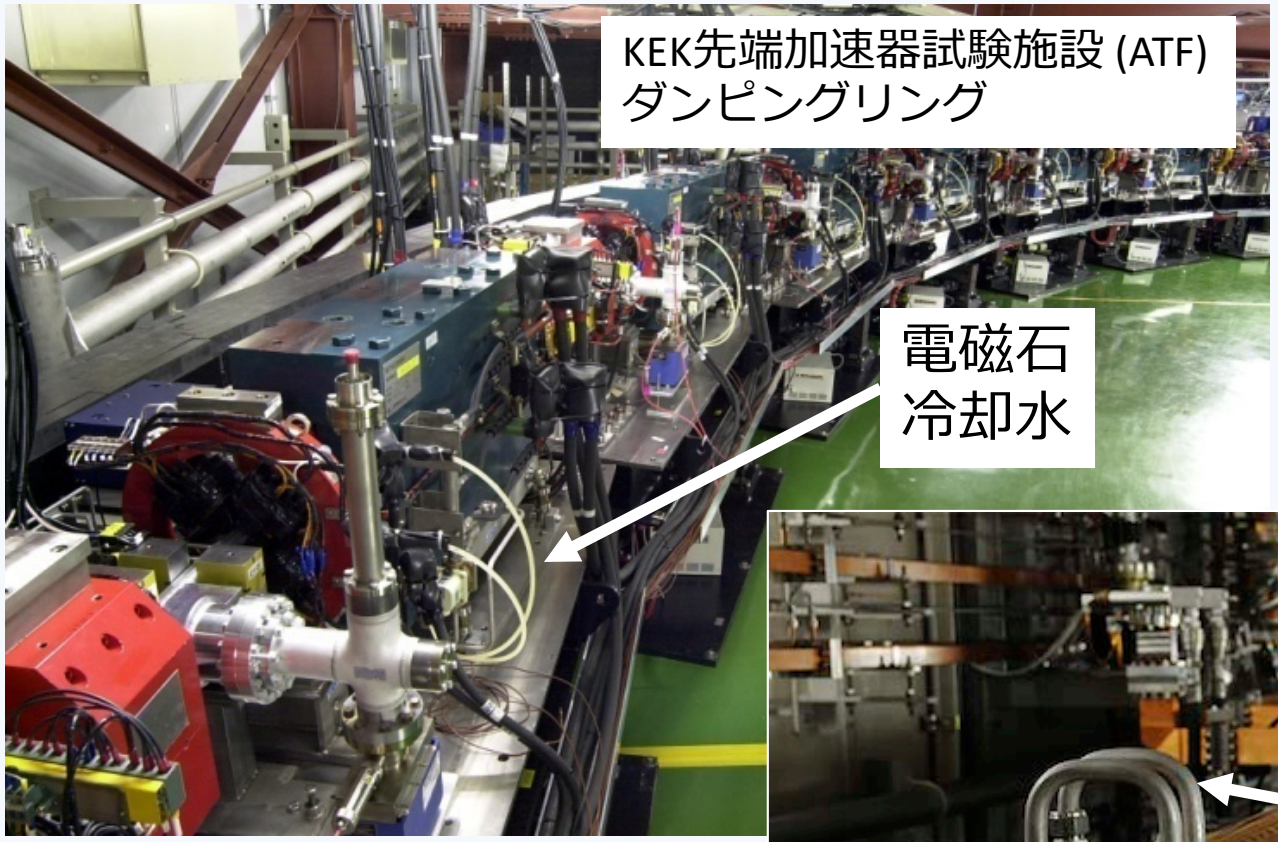
冷却水システムの概要

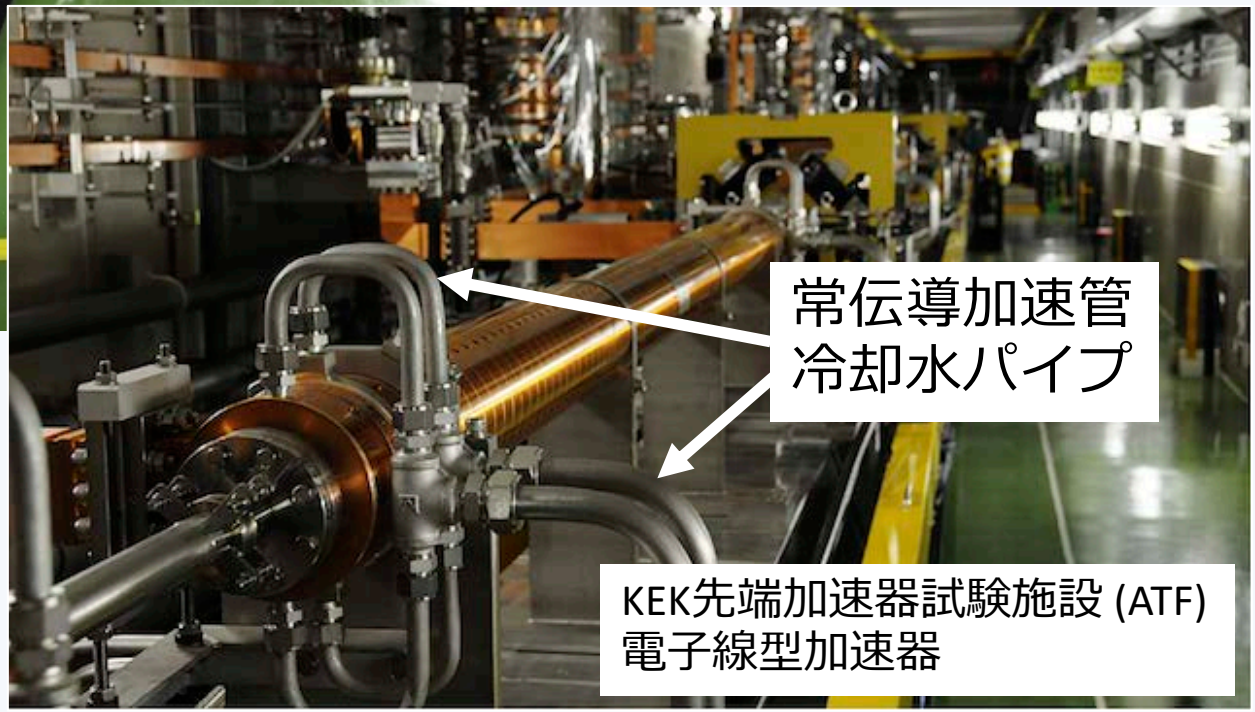
多段式の循環水による熱伝送システム

- **加速器装置の冷却**に用います。
- 地下の**アクセスホール**で地上との**熱の受け渡し**をします。
- 装置までは**熱交換器**を介した**2段**または**3段階**の冷却水系で接続します。
- 全て**密閉した循環水系（純水）**です。
- 放射化はビームがぶつかる限られた場所でおこります。**ビームダンプ水は厳重に管理**します。



電磁石や加速装置の冷却水





空気中にできる放射性物質

- 空気を構成する酸素、窒素、アルゴンが放射化されます
- **空気の密度**は**低い**ので、生成する**放射性物質の量も少なくなります**
- 生成する放射性核種は右表の通りです。**半減期が短いものが多く**、運転停止後**急速に無くなります**
- トンネル内の放射性物質の濃度を監視し、排気中濃度限度を超える恐れがある場合は、**加速器運転中のトンネルを内気循環とします**

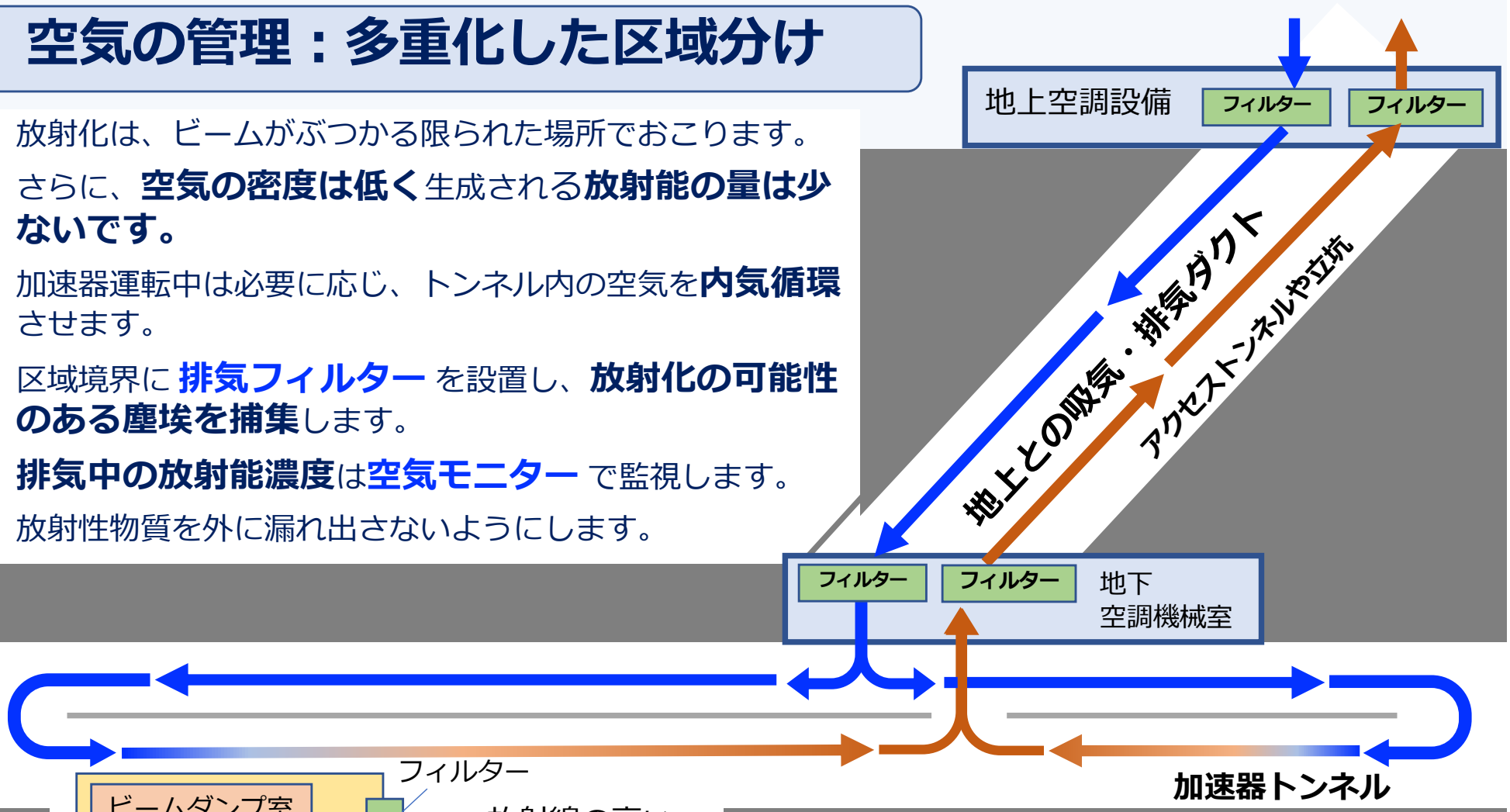
電子加速器の運転に伴い、空気中にできる主な放射性物質

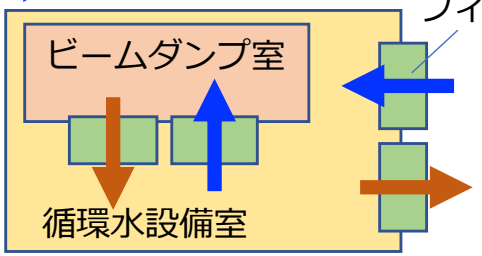
核種	半減期
炭素11	20.34分
窒素13	9.96分
酸素15	123秒
アルゴン41	1.83時間

換気システムの概要

空気の管理：多重化した区域分け

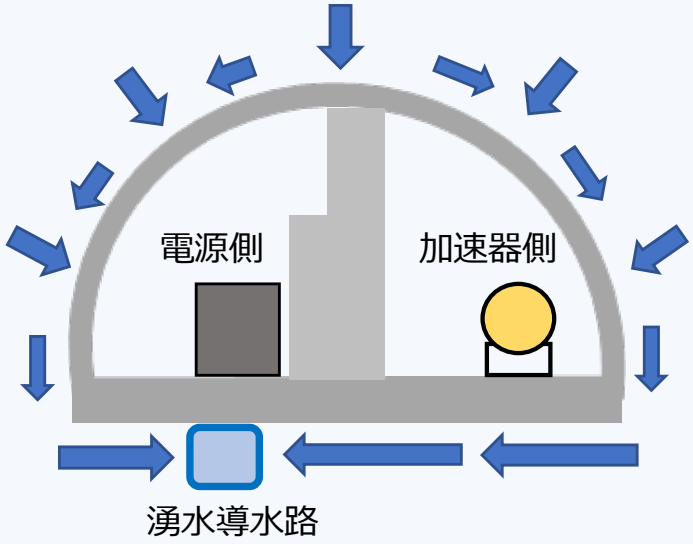
- 放射化は、ビームがぶつかる限られた場所でおこります。
- さらに、**空気の密度は低く**生成される**放射能の量は少ないです。**
- 加速器運転中は必要に応じ、トンネル内の空気を**内気循環**させます。
- 区域境界に **排気フィルター** を設置し、**放射化の可能性のある塵埃を捕集**します。
- **排気中の放射能濃度**は**空気モニター** で監視します。
- 放射性物質を外に漏れ出さないようにします。



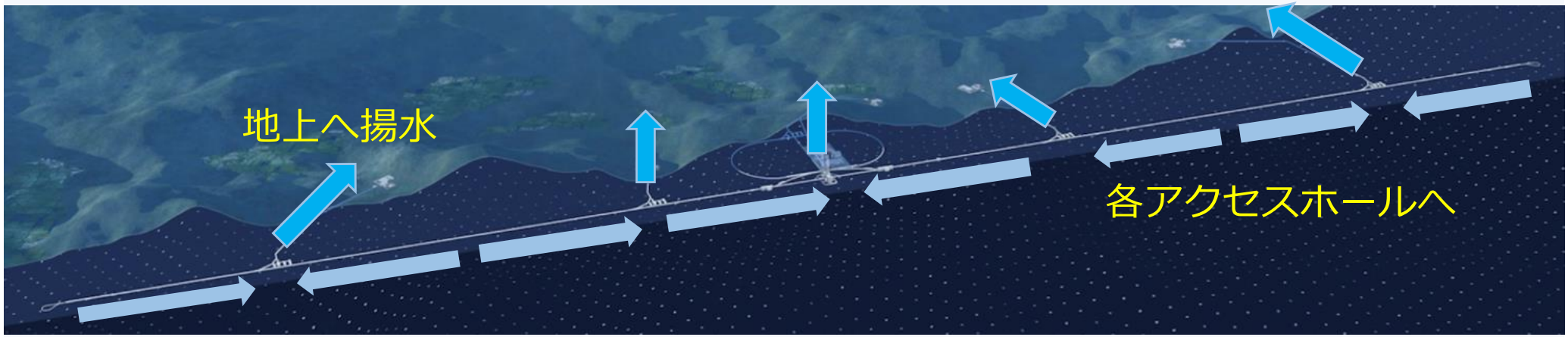


放射線の高い
ビームダンプや
陽電子源は、
特に厳重に管理

地下水（自然湧水）の取り扱い



- ビームが物質にぶつかると、放射線が発生、周辺の放射化がおこります。ILCのほとんどの場所では、ビームがぶつからず、放射化の恐れはありません。
- ビームがぶつかる場所は、局所的に遮蔽体で覆い、周辺の放射化を防ぎます。
- **地下水はトンネルの外側にあるので放射化しない設計となります。**
- 加速器のトンネルは、道路トンネルと同様の工法で作られます。
- トンネルの壁は、厚さ30cmのコンクリートとその外側の防水層からなります。トンネル周辺の自然湧水は、岩盤と防水層の間を流れ、トンネル内には入りません。



トンネル床下の湧水導水路を通してアクセスホールの揚水設備に集め、ポンプで地上に送り、一部を冷却塔の補給水に利用、排水します。定期的な水質測定を行い安全を確認します。

地下水（自然湧水）量の想定

2018年8月18日学術会議ILC検討委員会。技術検証分科会の資料より抜粋

ILC地下構造物の地下水処理

＜参考資料＞ 国内トンネルの湧水量実績例

岩種別トンネル湧水量一覧（工事中） /統計的予測 –日本トンネル技術協会調査1982y

岩種	坑口最大湧水量 (t/min)	貫通時の比湧水量 (t/min/km)	比湧水量の平均値 (t/min/km)
火山岩	9.0	1.7	0.6
深成岩	4.1	1.5	0.6
中・古成層	2.0	3.2	1.2
泥岩・砂岩	1.1	61.0	0.3
砂礫	0.6	1.4	-

- ILCサイト(花崗岩+堆積岩)での湧水量は、上表の工事中湧水量を参考にしつつ、土木学会等で推奨されている0.5t/min/kmに安全率2を乗じ、1t/min/kmと仮定し算出した。

工事中と恒常的湧水量の比較事例 /主な鉄道トンネル事例 -JRTT調査

線区	延長 (m)	貫通時期 (年・月)	工事中湧水量 (t/min/km)	恒常的な湧水量 (t/min/km)
津軽海峡線 (青函トンネル)	53,850	S60.3	0.93	0.37
東北新幹線 (八戸-新青森)	26,455	H17.2	1.66	0.60
東北新幹線 (盛岡-八戸間)	25,808	H12.6	0.59	0.24
北陸新幹線 (長野-金沢間)	22,251	H19.12	1.15	0.62

約1/2以下に減

2018.8.20 学術会議ILC検討委・技術検証分科会 50

- 国内のトンネル工事での実績から、ILC地下トンネルの地下水処理は、およそ1t/min/kmの湧水量を想定して検討されてきました。
- 北上候補地における水文地質学的な考察では、およそ0.8t/min/kmと予測されています。

地震の影響について

- **地震の振幅**は地上に比べ**地下では1/2～1/4**になることがわかっています。

  （独）防災科学技術研究所の強震度観測網 (KIK-net) 測定データ
  東和と藤沢に設置された地表と地下100mの地震計のデータ（最大加速度）から、**地下100m**では、地表に比べ、**揺れは0.13～0.29倍**であった。
  東日本大震災の際には、震度6弱の東和で0.242、深度5強の藤沢で0.225倍。

- ILC施設は、震度７相当の地震があっても安全であるように設計します。
- 地震発生時には、揺れを感知して直ちにビームが停止します。

江刺地球潮汐観測施設の例

阿原山中腹の延長250mの**トンネルに設置**された国立天文台江刺地球潮汐観測施設の石英ガラス製の石英管ひずみ計は、**東日本大震災でも全く損傷を受けませんでした。**

高エネルギー加速器研究機構の例

震度4以上の地震が発生した場合、加速器施設を点検して運転を再開します。これまでの経験では、震度5の地震でも点検後に問題なく運転再開できています。東日本大震災（震度6弱）でも放射能の漏洩等は全くありませんでした。停電の影響、主に地上の設備の損傷への対処が必要でしたが、数か月で試験運転を再開しています。

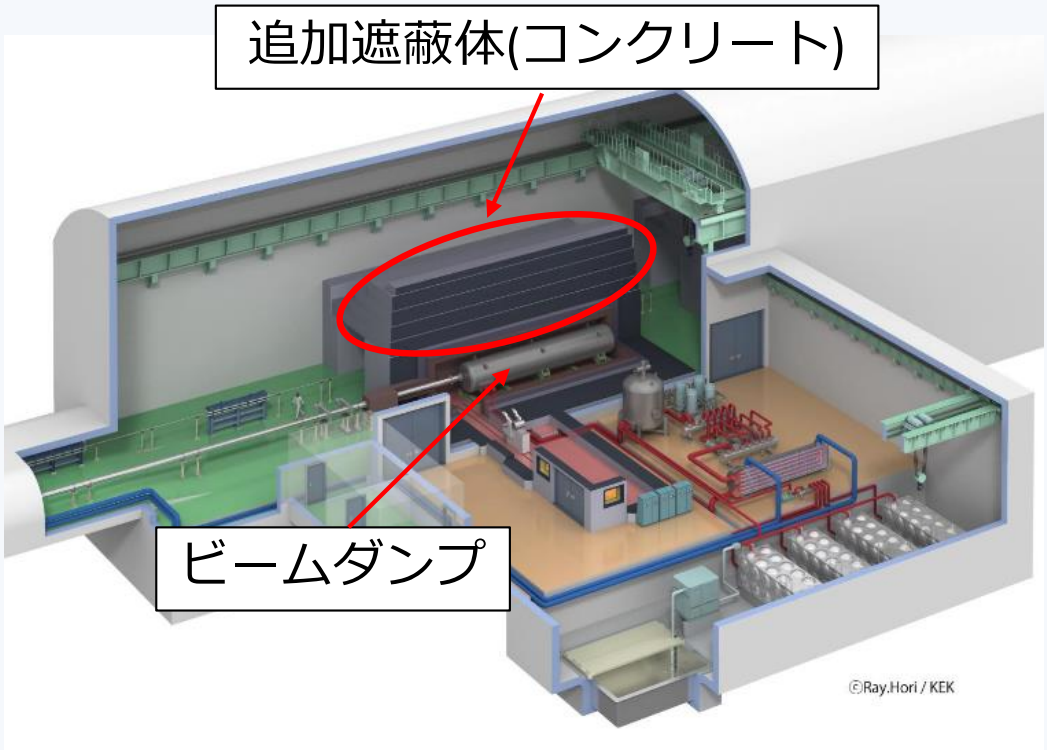
実験終了後の放射化物の取り扱い

- トンネルの床や壁の放射化を避けるため、あらかじめ遮蔽体を追加しておきます

- 他施設で使用する装置は一時保管、その他の放射化物（ビームダンプ水を含む）は引き取りを依頼します

  国が計画している「研究施設等廃棄物の埋設事業」への引き渡しなどが考えられます

- その他の加速器構造体はほとんどが非放射化物であり、他の実験での再利用を行います



研究施設等廃棄物の埋設事業（1）

JAEA 埋設事業センター　https://www.jaea.go.jp/04/maisetsu/

研究施設等廃棄物の埋設事業（2）

埋設処分業務の実施状況について　https://www.jaea.go.jp/04/maisetsu/reference/download/20190807kyougikai18_shiryou18-2.pdf

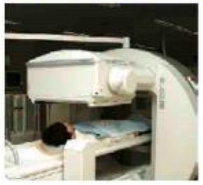
埋設事業に係るこれまでの経緯

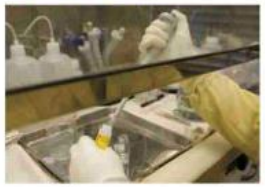
原子力発電所以外の原子力の研究開発や放射線利用における放射性廃棄物の発生

研究用原子炉

核燃料試験研究

大学等での基礎研究


病院での検査


小規模施設での研究等

○廃棄物発生事業者：約2，400事業所
- （国）日本原子力研究開発機構が主要発生者
- その他は、独立行政法人、大学、公益法人、医療法人、地方自治体、民間企業

○研究施設等廃棄物
：大半は廃棄体化処理がされていない状態で約59万本が保管中（このうち、原子力機構は約35万本）

（平成30年3月末時点。物量は200Lドラム缶換算値）

原子力機構における廃棄物保管状況

解体中の原子力施設

1）近い将来、各施設の保管能力を超える恐れ

2）これに伴い新たな研究・開発に支障

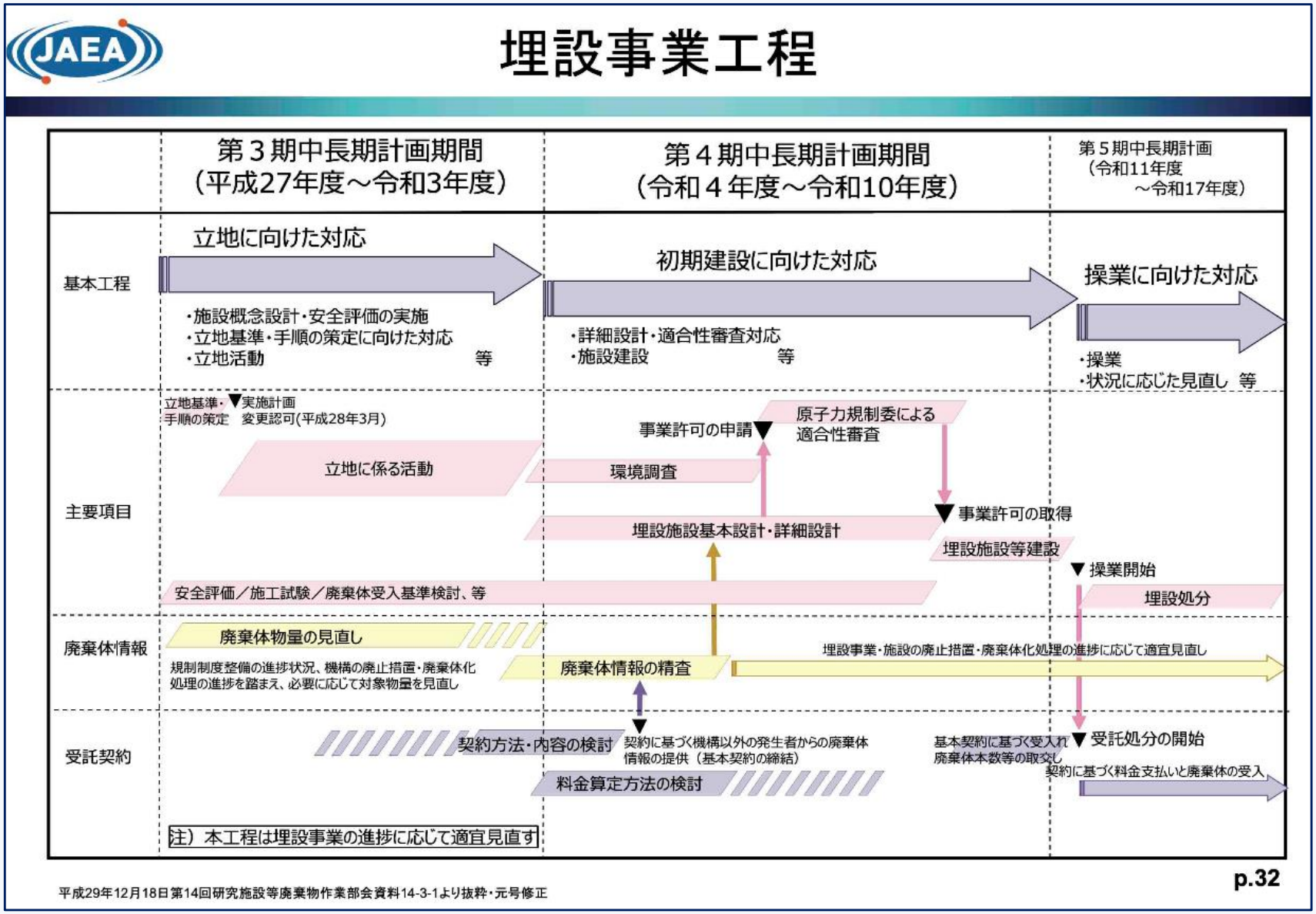
3）老朽化施設 の解体が困難

早急な放射性廃棄物埋設処分場の整備が必要

p.1

研究施設等廃棄物の埋設事業（3）

埋設処分業務の実施状況について　https://www.jaea.go.jp/04/maisetsu/reference/download/20190807kyougikai18_shiryou18-2.pdf



放射線・放射能に係わる法規制

- **ICRP（国際放射線防護委員会）**
  - 放射線障害から人を守る「放射線防護」について、1928年以来、専門家の立場から勧告をおこなっている国際組織です。
  - その勧告は、世界各国の法令や規制の基礎とされています。

日本では下記の規制に従っています

- **放射性同位元素等の規制に関する法律**
  - 2019年9月1日に「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」を改名
- **告示：放射線を放出する同位元素の数量等を定める件**
  - 敷地境界で3ヶ月あたり250μSv
  - 排水中濃度限度　トリチウムで60ベクレル/cc（毎日２Lの60ベクレル/ccの水を1年間飲み続けた場合の被ばくは、~0.8mSv）

https://www.jrias.or.jp/books/cat/sub1-01/101-14.html

トリチウムの影響について

- 日本における放射性物質の規制基準は、ICRP(国際放射線防護委員会)*の勧告をもとにしています。

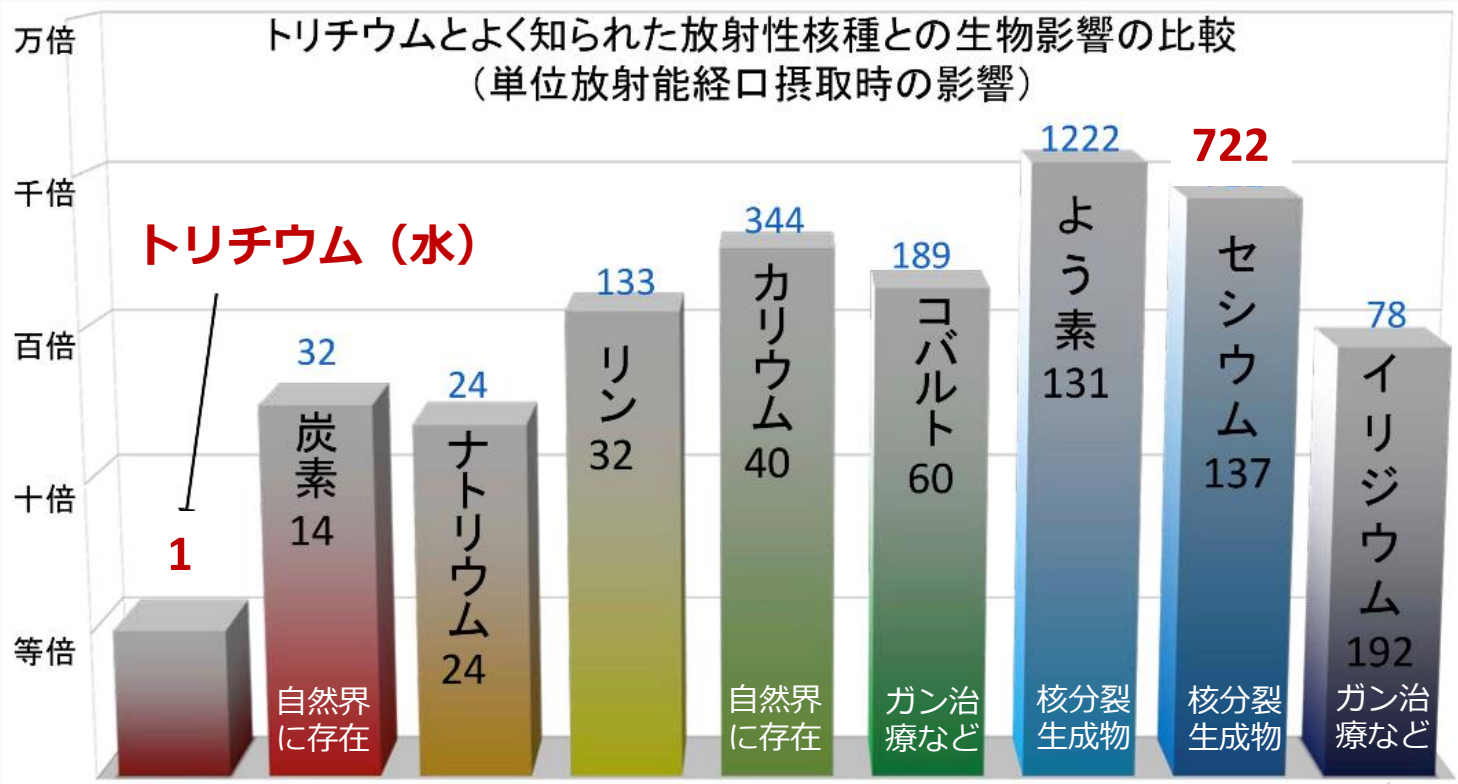
- 国際放射線防護委員会の1990年勧告：55ページ　http://www.icrp.org/docs/P60_Japanese.pdf
  “自然放射線源からの年実効線量は約1mSvであり、海抜の高い場所およびある地域では少なくともこの2倍である。これらすべてを考慮して、委員会は、年実効線量限度1mSvを勧告する。”
- 国際放射線防護委員会の2007年勧告：60ページ　http://www.icrp.org/docs/P103_Japanese.pdf
  “計画被ばく状況における公衆被ばくに対しては，限度は実効線量で年1mSvとして表されるべきであると委員会は引き続き勧告する。”

- 日本の規制基準は1990年勧告にもとづき、公衆の追加的な被ばくを「年間1ミリシーベルト未満」に保つようさだめられています。 トリチウムの排水濃度限度は１立方センチメートルあたり60ベクレルです。

- 米国では、１立方センチメートルあたりの基準として、排水基準(350ベクレル)、地表水基準(70ベクレル)、飲料水基準(0.74ベクレル)が設定されています。
  - ICRPは、放射線障害から人を守る「放射線防護」について、1928年以来、専門家の立場から勧告をおこなっている国際組織です。その勧告は、世界各国の法令や規制の基礎とされています。
  - 計画被ばく状況：被ばく状況を、計画的に管理できる平常時

トリチウムの影響（内部被ばく）

- 1ベクレルの放射性物質を摂取した場合、トリチウムの影響はセシウム137の約700分の１です
- 人の体内には、元々、数十ベクレル程度のトリチウムが含まれています



出典元：トリチウムの性質等について(案) （参考資料）多核種除去設備等処理水の取扱いに 関する小委員会 事務局
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committtee/takakusyu/pdf/008_02_02.pdf

ILCと原子力施設の比較

	ILCビームダンプ	原子炉
停電時・地震時	ビームは停止し、新たな放射化物の生成はない。**継続した冷却を必要とするものは無い。**	**常時冷却が必要**
生成される物質	ダンプ水には酸素より重い元素は生成されない。 **（セシウム、ヨウ素は生成されない）** ビームダンプ本体や周囲の放射線シールドが一部放射化するが、放射能は素材内部にとどまり飛散しない。	核燃料の核分裂により様々な物質が生成される。 福島第一原発事故では、気体状核分裂生成物質の放出から ● **セシウム134/137**（20ペタBq=**20,000**兆ベクレル） ● **ヨウ素131**（500ペタBq, **500,000**兆ベクレル） が拡散した [1]
トリチウムを含む水	**放出しない**	**海洋放出** **規制値(60ベクレル/cc)以下に希釈して放出** 5年平均の年間排出量 加圧水型PWR：18 ～ 87兆ベクレル 沸騰水型BWR：0.02～2.2兆ベクレル
トリチウム貯蔵量	20年間休み無く運転した場合の 最大蓄積量：100兆ベクレル 1年での生成量：約3.6兆ベクレル（250GeV標準運転） 水量：およそ**100トン** （設備内で循環：増えることはありません）	**福島第一原発事故** 事故時の1-3号機：3400兆ベクレル[2] 処理水タンク内：1000兆ベクレル[2] 処理水の水量：(2019/8/22現在) **115万トン**[3]

1)福島第一原発事故と放射線 https://www.reconstruction.go.jp/Yamagata03_yushikisya01.pdf
2)多核種除去設備等処理水の取扱いに関する小委員会 説明・公聴会 説明資料（案）
https://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/osensuitaisaku/committtee/takakusyu/pdf/009_04_02.pdf
3)東京電力 処理水ポータルサイト http://www.tepco.co.jp/decommission/progress/watertreatment/

国際熱核融合実験炉ITERのトリチウム

- 核融合炉のDT燃焼と呼ばれる反応では、重水素とトリチウムの反応を使います。

$$D+T \rightarrow {}^{4}He+n(\text{中性子、}14MeV)$$

- 核融合炉の周囲をリチウムで囲み、高速中性子を減速させながら核反応を起こして、トリチウムを回収することも考えられています。

$${}^{6}Li+n \rightarrow T+{}^{4}He+4.8MeV$$

$${}^{7}Li+n \rightarrow T+{}^{4}He+n-2.5MeV$$

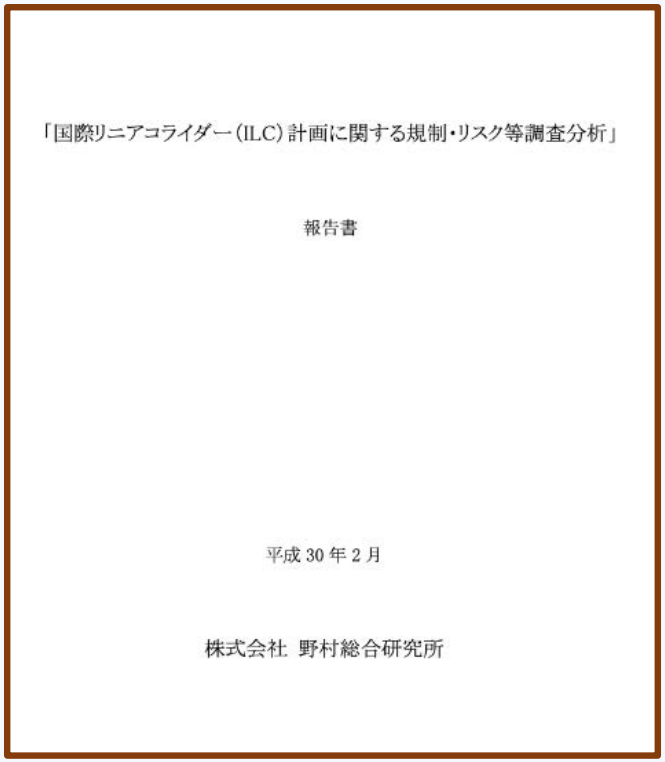
- **国際熱核融合実験炉(ITER)では、トリチウムを最大4kg程度保有する計画*です。**
- ILCでは20年間運転継続した場合にビームダンプ水に最大100兆ベクレル（0.3ｇ）のトリチウムが蓄積します。
- ITERにおけるトリチウム保有量は、ILCビームダンプの約1万倍以上です。

*http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JSPF/jspf2016_06/jspf2016_06-440.pdf

文部科学省「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議」における委託調査

平成26年度：ILC計画に関する技術的・経済的波及効果等調査分析報告書
平成27年度：ILC計画に関する技術的実現可能性等調査分析報告書
平成28年度：大型国際共同プロジェクト等の国際協力事例に関する調査分析報告書
平成29年度：ILC計画に関する規制・リスク等調査分析報告書
平成29年度：国際大型加速器計画のコスト削減に関する調査研究報告書

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/index.htm


「国際リニアコライダー（ILC）計画に関する規制・リスク等調査分析」

報告書

平成 30 年 2 月

株式会社 野村総合研究所

調査の内容
（1）ILC の建設・運用に係る法的規制等に関する調査分析
（2）ILC の建設・運用に係るリスクに関する調査分析
（3）ILC の建設・運用に係るリスクのマネジメントに関する調査分析

日本学術会議での審議 – ビームダンプ関係

「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会」の技術検証分科会において、主として大型施設の建設に関連する事項に関して、技術的・専門的な見地より妥当性の検証が行なわれました。

http://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/ILC/ILC24.html

ビームダンプに関する報告：

第1回（平成30年 8月10日）資料５ ILCの加速器施設　P.26
第2回（平成30年 8月20日）資料１ ビームダンプについて　P.1-18
第4回（平成30年 9月13日）資料１ 検討されているリスクについて　P.3-13、P.30-42
第6回（平成30年10月 2日）資料1-1 論点メモについての回答　P.2,3、P.23-30、P.35-40、P.60-68
資料2-2 KEK-ILC アクションプラン　P.15
資料３ ILCエリアシステムの性能　P.22、P.87、P.90、P.91

平成30年12月19日に日本学術会議から出された「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する所見」（http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-k273.pdf）には、P.8に記載があります。

高エネルギーに加速された電子及び陽電子ビームは衝突点を通過した後、ビームダンプに入射する。ビームダンプは、沸騰抑制のために圧力を高めた水で満たされている。窓材や水ダンプへの局所的負荷を分散するためにビーム入射点を高速で回転掃引する設計となっている。ILCの運転に伴う放射化によって、ビームダンプにはトリチウム等の放射性物質が生成・蓄積される。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。特に、窓材等の長期的消耗に対処する保守点検及び交換方法に関する事項や、放射性物質の(万が一の)漏出事故等に備えた安全対策を含む不測の事態に対する備えについて丁寧な説明が必要であろう。

「ILCプロジェクト実施に関する提言」

KEKは2019年5月に、欧・米・アジアの7名の研究者からなる**ILC 国際ワーキンググループ**を設置しました。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もので、9月までに5回の会合を持ち、ワーキンググループの議論をまとめた最終報告書をKEKに提出しました。KEKは、その内容を吟味し、「ILCプロジェクト実施に関する提言」として公表しました。

https://www.kek.jp/ja/newsroom/2019/10/02/1000/
https://www2.kek.jp/ilc/en/docs/Recommendations_on_ILC_Project_Implementation.pdf

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、国際協力で進めるべき必要な技術課題と国際協力先の候補をまとめました。

TABLE OF CONTENTS

1. Introduction 1
2. International Cost Sharing for ILC Construction and Operation 3
2.1. General Principles 3
2.2. Sharing of ILC Construction Cost 4
2.2.1. Civil Engineering 4
2.2.2. Conventional Facilities 4
2.2.3. Superconducting RF and Accelerator Components 5
2.2.4. Sharing of Person-Power Contributions during Construction of the Accelerator 5
2.2.5. ILC Laboratory Central Budget During Accelerator Construction 6
2.3. Sharing of ILC Detector Construction and Operation 7
2.4. Function of the ILC International City 7
2.5. Sharing of Operational Cost 8
2.6. Sharing of the Decommissioning Cost 8
3. Organization and Governance 9
3.1. Introduction 9
3.2. ILC Pre-Lab 10
3.2.1. Host Laboratory and Member Laboratories 10
3.2.2. Mandate 10
3.2.3. Organization 11
3.2.4. Funding 11
3.2.5. Project Management 12
3.2.6. Preparation for Mass Production and Towards Hub Laboratories 12
3.2.7. Regional Design Offices 12
3.2.8. Interplay between the Pre-Lab and Inter-governmental Negotiations 13
3.3. ILC Laboratory 13
3.3.1. Legal Basis 13
3.3.2. Governance and Organizational Structure 14
3.3.3. Council Representation and Voting Structure 14
3.3.4. Laboratory and Project Management 15
3.3.5. Interface between ILC Laboratory and Experiments 16
4. Technical Preparation Plan in Response to MEXT's ILC Advisory Panel and the Science Council of Japan (SCJ) 17
4.1. Technical Preparation Plan of the Main Preparatory Phase 17
4.2. Specific Items Identified by MEXT's ILC Advisory Panel and the SCJ report 18
5. Summary 23
Appendices 24
A. Charge to KEK International Working Group on the ILC Project 24
B. Member List of KEK International Working Group on the ILC Project 25
C. Member List of the Preparatory Group 25
D. Meeting Records 25
E. Current Status of ILC Accelerator 26
E.1. ILC 250 Accelerator Overview 26
E.2. ILC Accelerator Preparation Status 26
E.2.1. Superconducting RF (SCRF) cavities 26
E.2.2. Positron Source 27
E.2.3. Damping Ring 29
E.2.4. Interaction Region 29
E.2.5. Beam Dump 30

「ILCプロジェクト実施に関する提言」：ビームダンプに関する記載

Beam Dump: SCJ and MEXT's ILC Advisory Panel stated technical concerns regarding: reliability, earthquake protection, and stability of the window of the main beam dump; reaction between the high energy beam and water; and containment of activated water. In the main preparatory phase, the scheme for monitoring the integrity of the beam dump window will be studied and the system design for items such as the containment of activated water will be performed. CERN operates beam dumps for large accelerators and high-power beam dumps, and the US operates water-circulated beam dumps. They could be important partners for the system design of the beam dump. KEK will lead the system design of the beam dump facilities, ensuring environmental and radiation safety with cooperation from the government, industry, and the scientific community.

日本学術会議(SCJ)所見と文部科学省(MEXT)のILC有識者会議では、

- 信頼性、地震対策、メインビームダンプ窓の安定性
- 高エネルギービームと水との間の反応
- 放射化した水の封じ込め

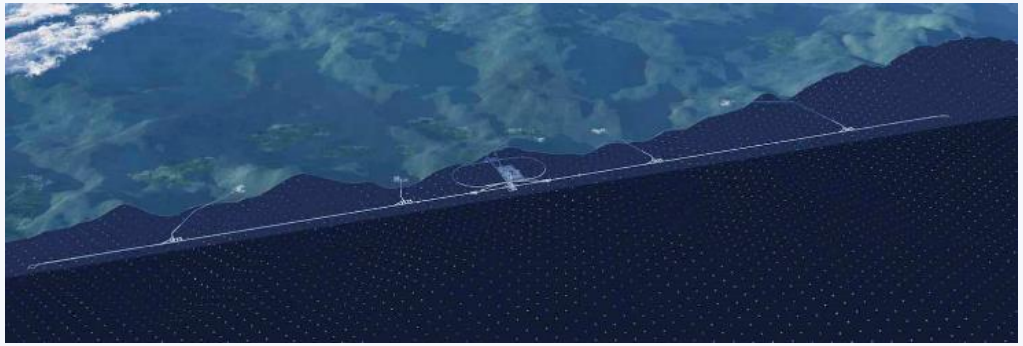
について技術的な懸念が挙げられました。

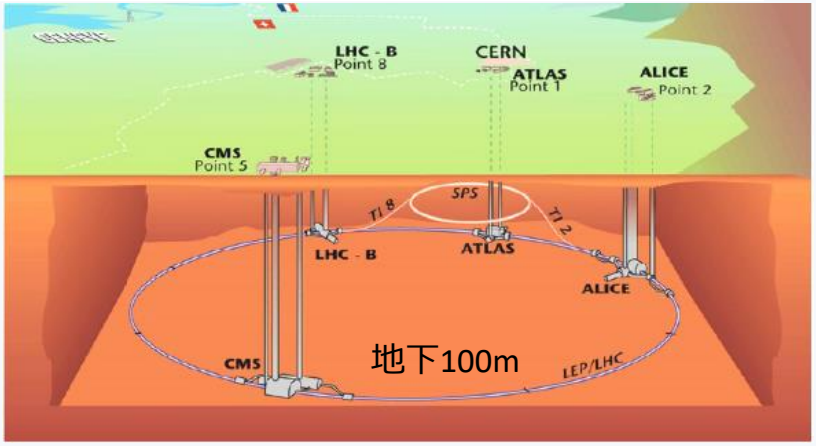
主準備期間では、ビームダンプ窓の健全性をモニターする方法の検討、放射化した水の封じ込めなどのシステム設計が実行されます。 CERNは大型加速器と高出力ビームのビームダンプを運用し、米国は水ビームダンプを運用しています。 彼らは、ビームダンプのシステム設計の重要なパートナーとなります。 KEKは産官学の協力の下で、環境および放射線の安全を確保し、ビームダンプ施設のシステム設計を主導します。

ILCと世界最大の加速器LHC

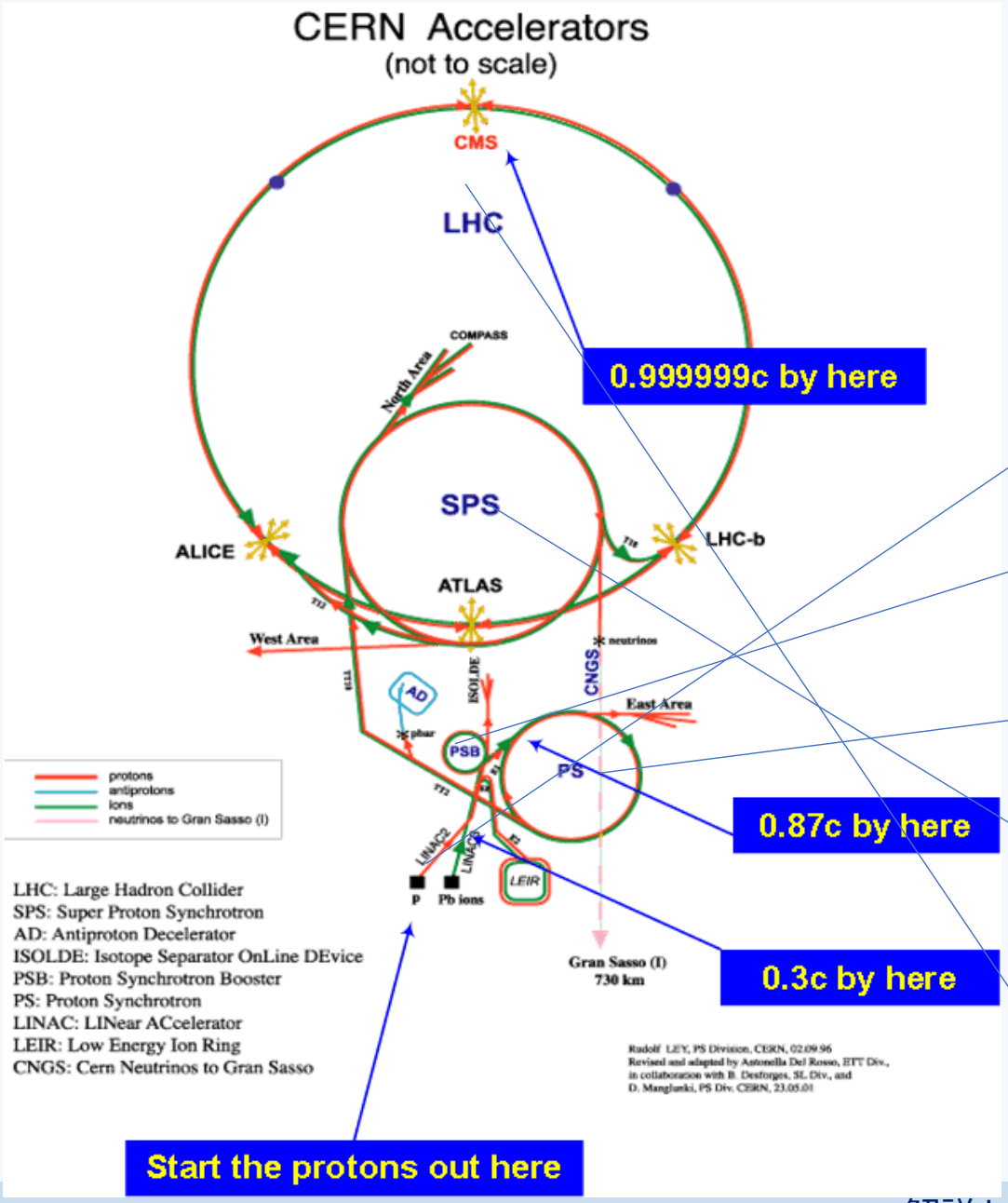
	ILC	LEP	LHC
場所	**北上地域**が候補地	スイス/フランス・**ジュネーブ**	
加速器トンネル	直線型 **20 km**	リング型 **27 km**	
実験	**電子・陽電子** **250 GeV**	**電子・陽電子** **200 GeV** （最大到達209GeV）	**陽子・陽子** **14 TeV** (14,000 GeV)
稼働	**準備 4年、建設 9年**を経て稼働する計画	建設（8年） **稼働（1989 ~2000）**	建設（13年） **稼働（2008～）**
電力	**120 MW**	**160 MW***	**120 MW***
ヘリウム（超伝導用）	60トン （超伝導加速空洞）	10トン （超伝導加速空洞）	150トン （超伝導電磁石・加速空洞）

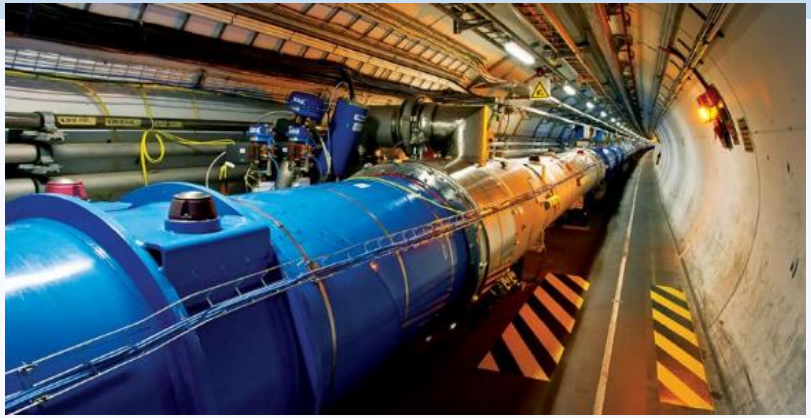
(*)主リングのみ。入射用加速器群は含まず。





大型加速器システム：CERN-LHC





Linac2: 陽子を 50MeV まで加速

PSB: （プロトンシンクロトロンブースター）
周回させながら 1.4GeV まで加速

PS: （プロトンシンクロトロン）
周回させながら 25GeV まで加速

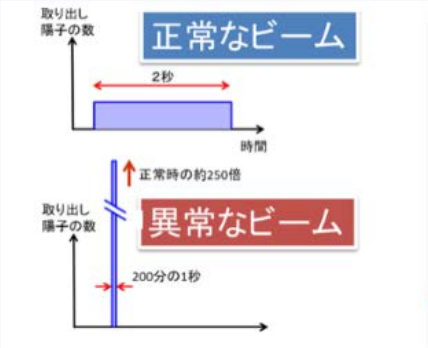
SPS: （スーパープロトンシンクロトロン）
周回させながら 450GeV まで加速

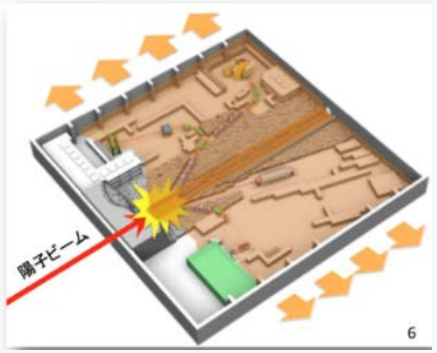
LHC: （ラージハドロンコライダー）
周回させながら 6.5TeV まで加速

LHC加速器トンネルにおける非常時・緊急安全対応

	LHC での対応（実績）
停電 （全期間）	1) <30秒：蓄電池（制御・モニター機器） 2) >30秒：非常発電機（照明、移動機器、排水） 3) <~1日：復電(発電機燃料備蓄）注：復電後He系復旧可
火事 （保守時）	1) トンネル・非火災側に退避→ 避難 2) 空調循環速度を人の移動速度以下に制御。 煙より早く避難（距離：**<3.4 km＋エレベータ）** 注：ケーブルなど、全て難燃性
Heガス漏洩 （保守時）	1) 酸素マスクを装着、トンネル底部に沿って退避 （He はトンネル上部に拡散・留まる：実験検証有り） 2) He 漏洩箇所 (Cryo-unit) 以外は、通常 回収
湧水（・建設時） （・保守時）	• 周辺土壌の凍結法により湧水防止（CMS立坑建設時） • 建設完了後のトンネル内への大きな湧水無し。微量の湧水は、組み上げ → 安全モニタ → 排水
トンネル入域・ ライセンス 装備	1) 上記についての講習、試験を経てライセンス 2) 入域時装備： ・CERN-ID （ライセンス登録付き） ・放射線作業者バッチ（モニター付き） ・ヘルメット（LED サーチライト付き） ・携帯酸素マスク・ボンベ(< 30分）、 ・酸素濃度計（アラーム付き） ・自転車、電動作業車（オプション）

J-PARCの被ばく事故



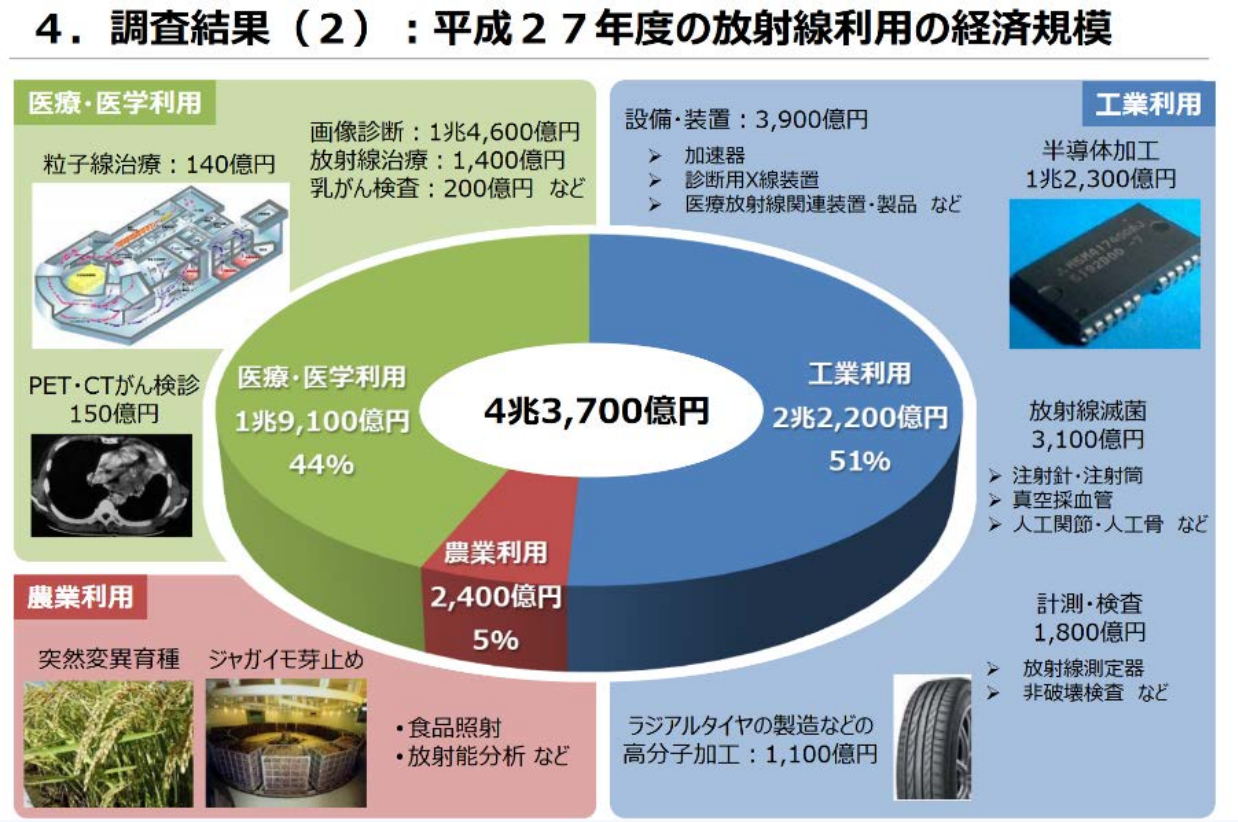


	J-PARC	ILC	
ビーム照射設備	**ハドロン実験施設**（地上）	**陽電子源** （地下トンネル）	**ビームダンプ** （地下トンネル）
目的	ハドロン粒子生成	陽電子生成	ビームの吸収
照射するビーム	**陽子ビーム**	**電子ビーム**	
ビームの照射	● **リング周回ビームを周回毎に少しずつ削り出す仕組み。** ● **電磁石の異常動作で、正常時の250倍の強度でビームが取り出され、放射化した金標的の一部が蒸発した。**	● **常に最大強度でのビーム入射（照射）となる。誤動作でも照射強度が増えることはない。** ● ビーム強度に対して余裕のある設計となっている。 ● 異常を検知した場合、直ちにビーム停止する。	
照射標的の状態	● **事故時は非密封** ● 実験室に飛散、研究者が被ばくした。 ● 現在は密閉容器に収納	● 真空容器内で使うため**密閉されている。** ● 万が一、標的の一部が蒸発したとしても、容器内に付着する。	● ビームダンプ容器内の水でビームを吸収。容器で**密閉されている。** ● 蒸発しない。最大でも沸点以下に留まる。

J-PARC事故の教訓 → 安全対策の徹底した見直しと追求、研究者の安全意識を高める

国内の放射線利用と法規制

- 国内の放射線利用は平成27年度に4兆円となっており、既に産業の中で重要な部分を占めています。その内訳は医療・医学、ジャガイモの芽止めなどの農学利用、放射線滅菌などの生活を安全・安心にする業務が6割、残りは半導体加工などです。



内閣府：放射線利用の経済規模調査
http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2017/siryo29/siryo1-1.pdf

- このような広い範囲の放射線利用を安全に行うための拠り所として放射性同位元素等の規制に関する法律が制定されており、高エネルギー加速器もこの法律に従っています。
- この法律が研究用加速器を規制するだけのものではなく、このような大規模な産業の安全確保のためのものであることをご理解いただければ幸いです。

FCCについて

- FCC（Future Circular Collider)はCERNで検討されている周長100kmの円形加速器です。
- 最初に電子と陽電子の衝突実験を行うFCC-eeを建設し、その後、陽子と陽子の衝突実験を行うFCC-hhに改造して運転する提案です。
- 2019年1月に概念設計報告書（CDR)が出されました。https://fcc-cdr.web.cern.ch/#
- FCC-eeは2029年から建設、2039年運転開始が提案されています。Higgs生成実験までで人件費を除く加速器建設費は105億スイスフラン（113円/スイスフランで計算すると1.186兆円）です。

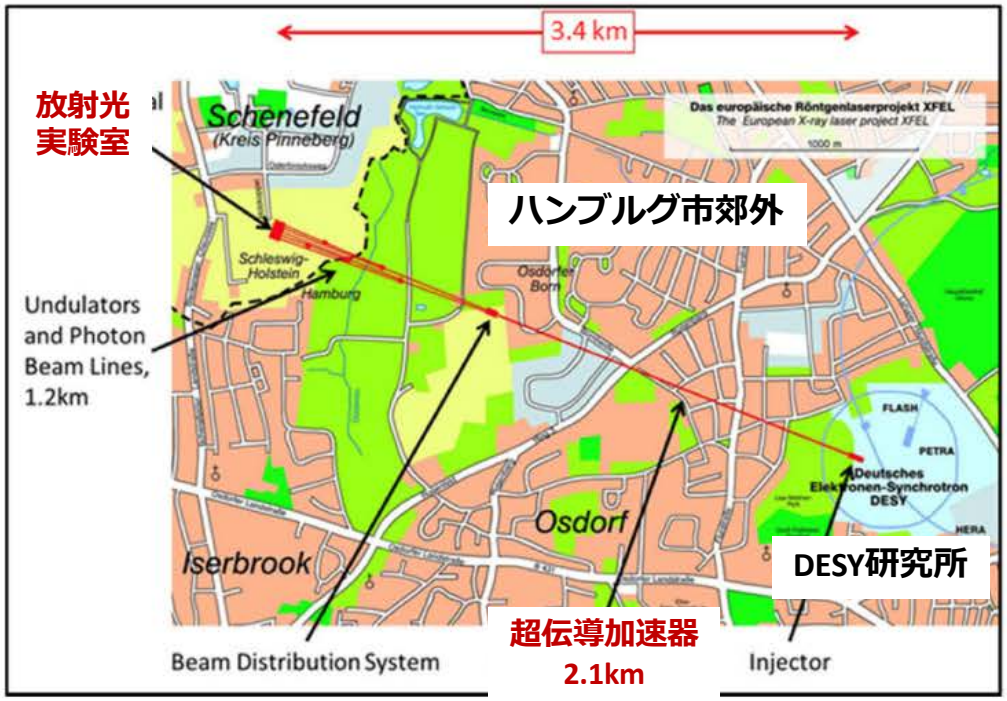
https://indico.cern.ch/event/808335/contributions/3380835/attachments/1845110/3026939/Summary-Accelerators-Granada.pdf

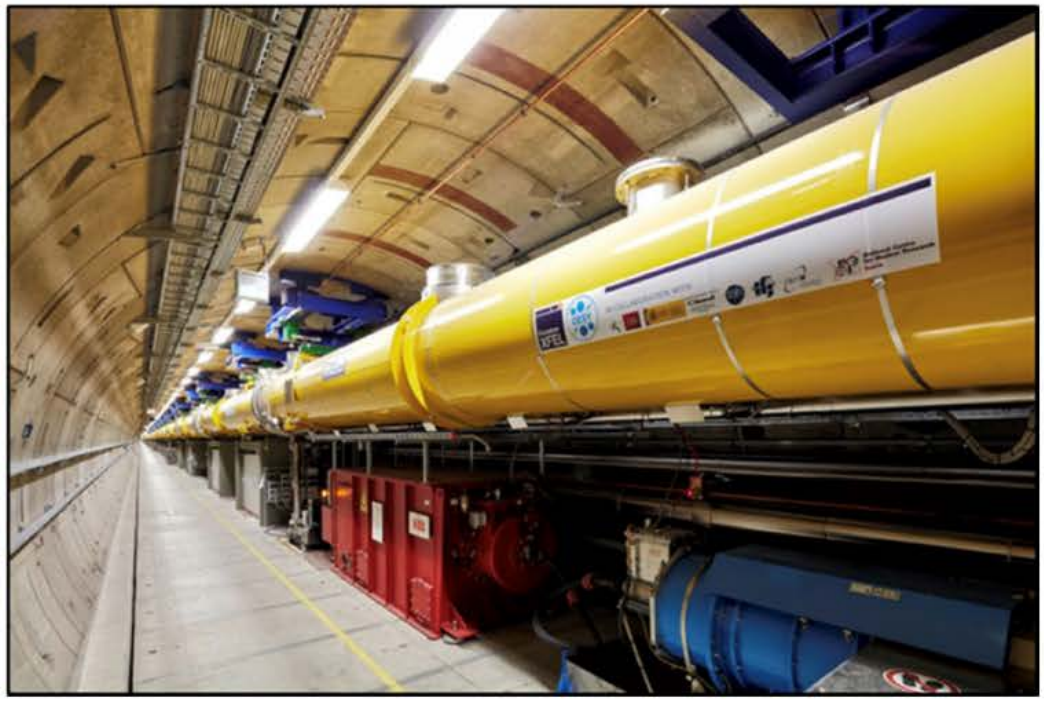
- FCC-eeではZ-pole (~91 GeV)4年、WW(~160 GeV) 2年の後、Higgs生成の実験3年を行うことが提案されています。
- ビーム偏極がない FCC では、Higgs結合の精密測定のため、Higgs生成だけでなく、Z-pole、WW の実験が必要です。このため、合計9年の実験が想定されています。
- 中国でもCEPCという、FCC-eeと同様の周長100kmの円形加速器が計画されています。

（参考）ILCはCDRの次のステップであるTDR（技術設計報告書）が2013年に出版されています。ILCの人件費を除く加速器建設費は5152～5332億円、人件費及び測定器を含めた総費用は7355～8033億円です。ILCの場合は、偏極電子ビームを利用するためHiggs 生成の実験を約11年行うことで目標の Higgs 結合測定が達成できます。

ILCと同じ超伝導加速技術に基づく電子加速器

- **欧州X線自由電子レーザー (European XFEL)：放射光利用施設**
  - 全長 3.4 km, 超伝導加速器 2.1 km, 17.5 GeV
  - **ILC主加速器の1/10スケールの実用機**
- ドイツのDESY研究所を中心にした**国際プロジェクト。**2017年9月から運転開始。





- 米国でも**SLAC研究所**が同様の放射光施設 **LCLX-II (超伝導加速器 1 km) を建設中**
- KEK、DESY、SLAC、その他関連研究機関が協力して超伝導加速器技術の高度化研究を進めています。
- これらの研究機関はILC国際研究組織の主要メンバーです。