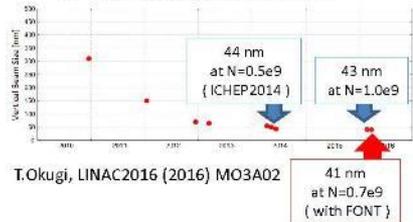


## ATF2 でのビームサイズ収束試験の現状

ATF2 では 41 nm (デザイン37nm) までビームサイズ収束を達成。  
 運転休止後も数時間で、ビームサイズを復元できている。

### ATF2で達成した最小ビームサイズの履歴

ATF2 では ILC に必要な最終収束系でのビーム収束技術を積み上げている。

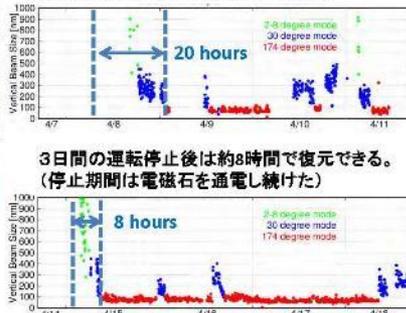


T.Okugi, LINAC2016 (2016) MO3A02

ATF2 仮想衝突点ではビームサイズを 41 nm まで収束することができている。

### ビームサイズ調整の経過の例

3週間の運転休止後は約20時間で復元できる。  
 (停止期間中は電磁石通電していない)

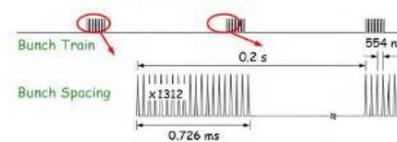


3日間の運転休止後は約8時間で復元できる。  
 (停止期間は電磁石を通電し続けた)

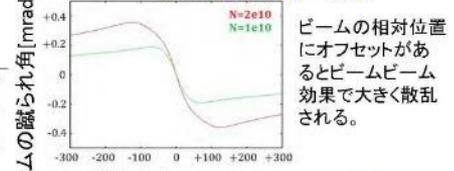
日本学術会議(2018/10/02) 奥木敏行, 第12回加速器学会(2015)FROL01

## FONT バンチトレイン内フィードバック

### ILC のバンチ構造



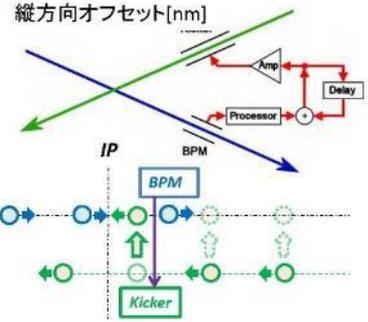
### CAIN によるシミュレーション



パルス間でのビームの位置は、地盤振動や機器のノイズで位置がずれる。

一方、パルス内では、ビームの位置は大きく変わらない。

パルス内の最初のビーム位置を測定して、トレイン内の後続バンチの位置を補正する高速フィードバックにより効率的なビーム衝突を実現できる。



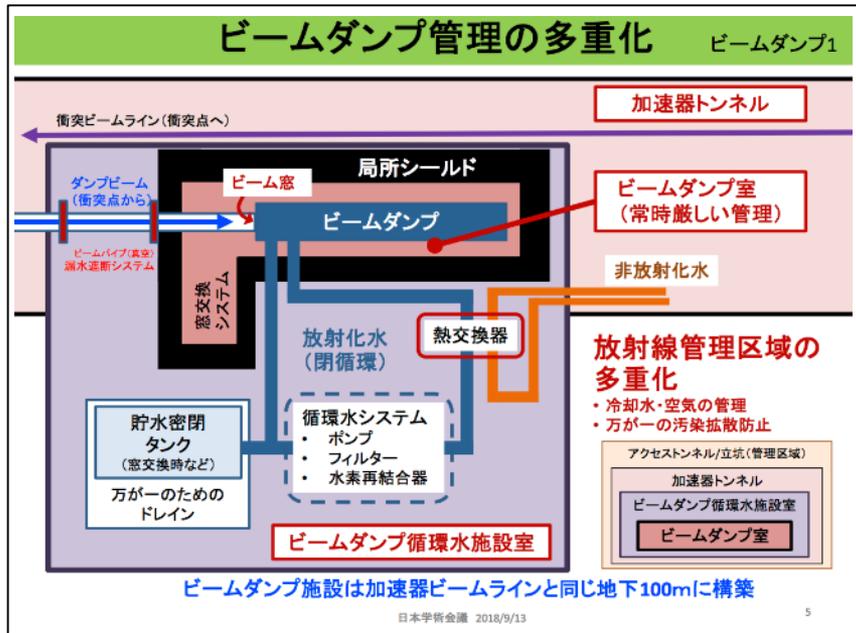
1)バンチ目は衝突しないが、2)バンチ目以降は衝突する。

日本学術会議(2018/10/02)

## 実証されたILCのパラメータ

パラメーター	要求仕様	設計仕様	達成値	実証場所など	コメント
ATF2 ビームサイズ ( $\sigma_y$ )	37nm (ATF2 design)		41nm	ATF2	T.Okugi, LINAC2016
ILC ビームサイズ	7.7nm (ILC design)			ATF2	ATF2の37nmがILC250の7.7nm相当
フィードバック位置安定度	12% of beam size (1nm)	10% of beam size	10% (FB OFF) ⇒ 4% (FB ON)	ATF2	P. Burrows, AWLC2018
フィードバック遅れ	< 554ns	< 366ns	232.4ns	ATF2	





日本学術会議 2018/9/13

### ビーム吸収体(循環水)について ビームダンプ2

	TDRビームダンプ設計	ILC-250
ビームエネルギー	500 GeV	125 GeV
ビーム入射での最大温度	循環水: 155°C ビーム窓(1mm厚): 74°C	循環水: 73°C ビーム窓(1mm厚): 82°C
TDR後の検討窓厚 → 最大5 mm	ビーム窓(5mm厚): 110°C	ビーム窓(5mm厚): 115°C
必要な水圧	10気圧 (沸点180°C)	3気圧# (沸点133°C)
水の噴き出し速度	45 m/s	24 m/s

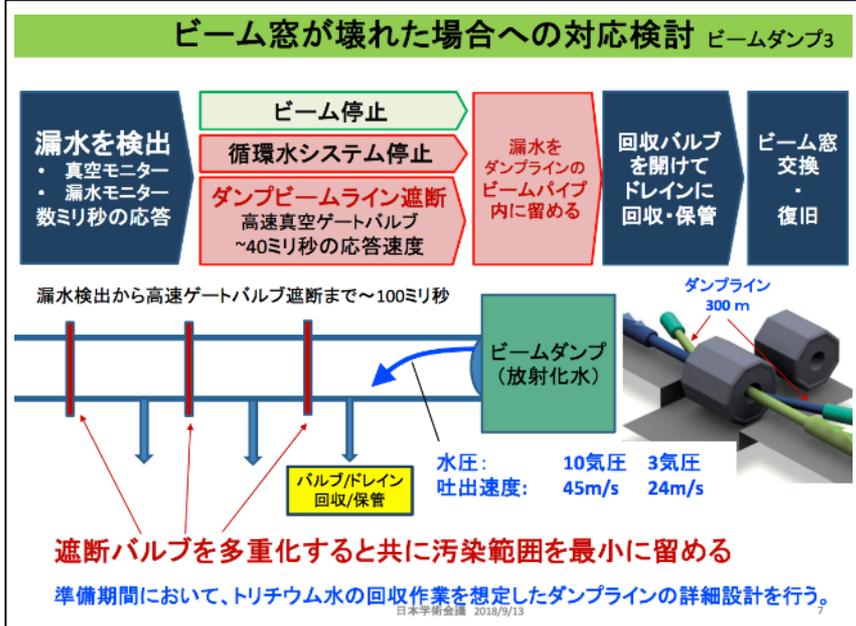
損傷したビーム窓から水が吹き出す速度を評価(ベルヌーイの定理から)

- ピンホールの場合
  - ビームパイプ(真空)へのリーク、凍結、融解、リークを繰り返す。
  - 多くの経験がある事象。
- より大きな穴
  - 速度は低下する。最大としてピンホールの速度で拡散を評価する。

#: 通常、加速器で使う冷却水はポンプで圧送されて3気圧以上となる。

6

日本学術会議 2018/9/13



日本学術会議 2018/9/13

### トリチウム水の取り扱い 3H

半減期12.3年

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

#### ビームダンプ4

トリチウムを含むシステムの例

- J-PARC 水銀標的: ILCと同等レベル
- 重水炉(ふげん)

これらの漏水対策を含めた実績・経験を取り入れて、準備期間で詳細設計を行う。

事故の想定

- 局所的な停電
  - 水の循環は直ぐには止まらない。それに対してビームはミリ秒で停止。
  - 安全管理/確認のために非常電源を用意
- 循環水の配管や計器などの接続部から漏水
  - 異常検出のためのモニター(温度、湿度、漏水、放射線量、...)の設置
  - 二重配管、漏水受けや拡散防止カバーなどによる多重化 → 漏水の回収・保管
  - 蒸発 → 室内空気: 除湿回収、立ち入り前のモニタリング
- ビーム窓の損傷による漏水
  - ダンプラインの真空パイプ内に漏水。
  - 多重化した高速ゲートバルブで遮断。
  - 漏水受けや拡散防止カバーなどによる多重化 → 漏水の回収・保管

8

日本学術会議 2018/9/13

**【さらに確認すべき点】**ビームダンプの健全性のモニター、遠隔操作による窓の交換はどのようにするつもりか。

ビームダンプの内側へのモニター設置は避け、外部に振動センサーや温度モニターを設置する、循環水の水质をモニターすることなどが検討されている。窓の交換については、J-PARCのビーム標的交換などの遠隔操作で実績のあるシステムを参考にし、窓を組み込んだ真空パイプを交換するなど、工程の最適化を検討している。

**ビームダンプの健全性のモニター、遠隔操作による窓の交換はどのようにするつもりか。(1)**

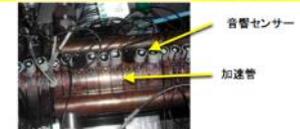
- ビームダンプの内側へのモニター設置は避け、外部に振動センサーや温度モニターを設置する、循環水の水质をモニターすることなどが検討されている。

システムの健全性を確認すること、異常の兆候を捉えることを目的とした監視システムを構築する。原子力や工業プラントなど、類似する特殊分野の専門家(JAEA, AAA参加企業など)の協力を得ながら進めるべきものと考えている。

**■ ダンプ容器本体の健全性**

- 温度測定
- 振動測定 ... 通常時との違いなどから異常の兆候を得たい  
例) 音響センサー、加速度センサー、レーザー光を用いた振動センサー など

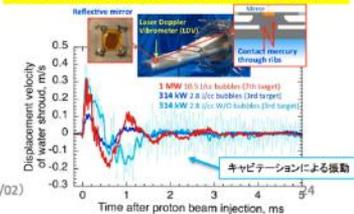
音響センサーの応用: 加速管(常伝導)における放電の研究; KEK



**■ ビーム窓、真空パイプ側の健全性**

- 真空度測定
- 漏水検出

レーザー光を用いた振動モニター(J-PARC水銀ターゲット)



**■ ダンプ水循環システムの健全性**

- 漏水検出、湿度測定
- 温度、圧力、流量測定
- 電気伝導度、pH、酸素濃度、水素濃度
- トリチウム濃度(定期サンプリング)
- ...

**ビームダンプの健全性のモニター、遠隔操作による窓の交換はどのようにするつもりか。(2)**

- 窓の交換については、J-PARCのビーム標的交換などの遠隔操作で実績のあるシステムを参考にし、窓を組み込んだ真空パイプを交換するなど、工程の最適化を検討している。

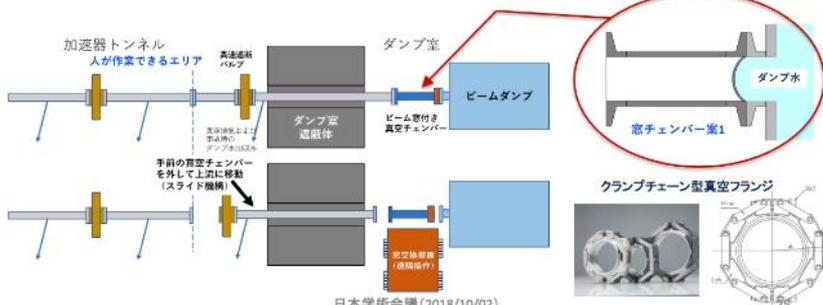
**■ 窓を組み込んだ短い真空チャンバーを外部で組み上げる**

- 現場での作業の簡略化
- 窓部分の止水・真空封止機能の確認(導入前試験が可能)

**■ 窓交換装置(遠隔操作)**

- チェンバー搬送・位置合わせ
- フランジ締め付け/取り外し: クランプチェーン方式など

詳細設計の項目  
 ・ 窓材(Ti合金)の接合・構造  
 ・ 真空とダンプ水の封じきり  
 ・ フランジ構造



**参考: J-PARC 1MW水銀ターゲット導入装置**

- 遠隔操作にて装置全体が直進する(差し込む)。
- 真空フランジはボルトで締め付け(パワー・マニピレータを使用)



ビームダンプの評価のために  
想定するビームパラメーター

	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	$2 \times 10^{10}$ (3.2nC)	$1.74 \times 10^{10}$ (2.79nC)	$2 \times 10^{10}$ (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**

2

ビームダンプの冗長化 (案)

■ 不慮の故障に対応

- 「放射化による復旧作業の制限=数年の停止」を回避

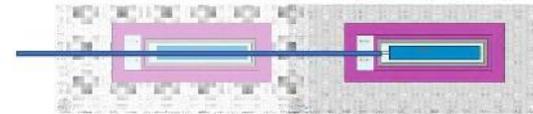
■ 経験を積んで高度化する

- 信頼性の向上、17MW(1TeV)等への技術確認

■ ダンプラインに直列配置

- $e^+e^-$ ビーム衝突で生じるBeamstrahlung光子 (直進) をビームダンプで受けるため。
- 2<sup>nd</sup>ダンプは1<sup>st</sup>の直前に後から設置する。床工事等はあらかじめ必要。冷却水施設は共用 (再利用) 可能。

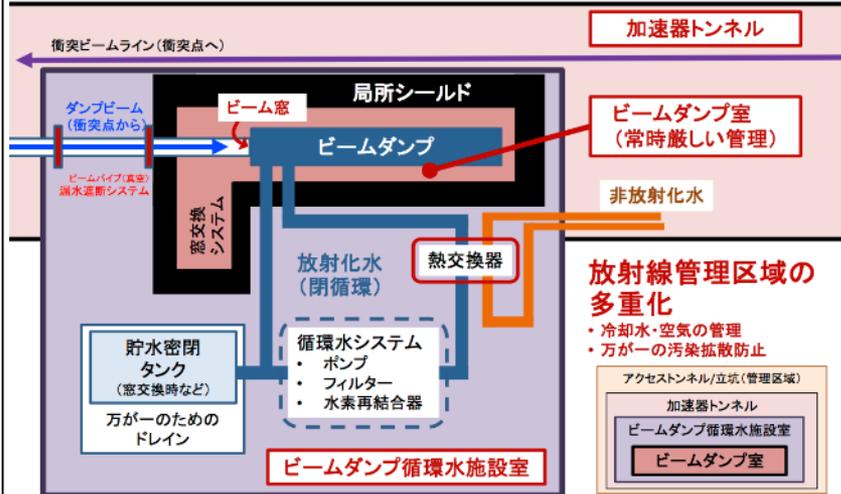
2<sup>nd</sup>ダンプ：追加約10億円      1<sup>st</sup>ダンプ：現コストに計上済



日本学術会議 (2018/08/20)

14

## ビームダンプ管理の多重化 ビームダンプ1



ビームダンプ施設は加速器ビームラインと同じ地下100mに構築

日本学術会議 2018/9/13

5

## ビーム吸収体(循環水)について ビームダンプ2

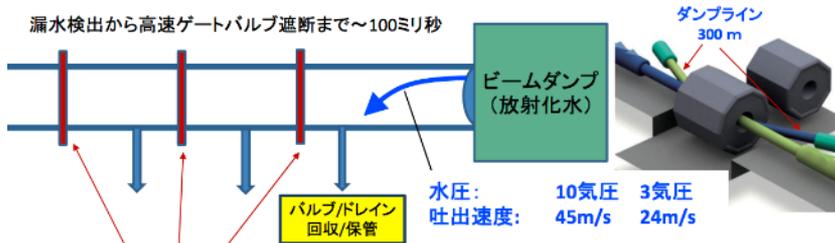
	TDRビームダンプ設計	ILC-250
ビームエネルギー	500 GeV	125 GeV
ビーム入射での最大温度	循環水: 155°C ビーム窓(1mm厚): 74°C	循環水: 73°C ビーム窓(1mm厚): 82°C
TDR後の検討窓厚 → 最大5mm	ビーム窓(5mm厚): 110°C	ビーム窓(5mm厚): 115°C
必要な水圧	10気圧 (沸点180°C)	3気圧# (沸点133°C)
損傷したビーム窓から水が吹き出す速度を評価(ベルヌーイの定理から)	■ ピンホールの場合 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ビームパイプ(真空)へのリーク、凍結、融解、リークを繰り返す。</li> <li>・多くの経験がある事象。</li> </ul> ■ より大きな穴 <ul style="list-style-type: none"> <li>・速度は低下する。最大としてピンホールの速度で拡散を評価する。</li> </ul>	
水の噴き出し速度	45 m/s	24 m/s

#: 通常、加速器で使う冷却水はポンプで圧送されて3気圧以上となる。  
日本学術会議 2018/9/13

## ビーム窓が壊れた場合への対応検討 ビームダンプ3



漏水検出から高速ゲートバルブ遮断まで~100ミリ秒



遮断バルブを多重化すると共に汚染範囲を最小に留める

準備期間において、トリチウム水の回収作業を想定したダンプラインの詳細設計を行う。

日本学術会議 2018/9/13

7

## トリチウム水の取り扱い

**<sup>3</sup>H** 半減期12.3年  
 β変換 最大 18.6 keVの電子を放出  
 最大飛程: 空気中 5mm  
 水中 0.006mm  
 外部被曝は無視できる  
 内部被曝に留意する

### ビームダンプ4

トリチウムを含むシステムの例

- J-PARC 水銀標的: ILCと同等レベル
- 重水炉(ふげん)

これらの漏水対策を含めた実績・経験を取り入れて、準備期間で詳細設計を行う。

### 事故の想定

- 局所的な停電
  - 水の循環は直ぐには止まらない。それに対してビームはミリ秒で停止。
  - 安全管理/確認のために非常電源を用意
- 循環水の配管や計器などの接続部から漏水
  - 異常検出のためのモニター(温度、湿度、漏水、放射線量、...)の設置
  - 二重配管、漏水受けや拡散防止カバーなどによる多重化 → 漏水の回収・保管
  - 蒸発 → 室内空気: 除湿回収、立ち入り前のモニタリング
- ビーム窓の損傷による漏水
  - ダンプラインの真空パイプ内に漏水。
  - 多重化した高速ゲートバルブで遮断。
  - 漏水受けや拡散防止カバーなどによる多重化 → 漏水の回収・保管

日本学術会議 2018/9/13

8

【さらに確認すべき点】ビームダンプの健全性のモニター、遠隔操作による窓の交換はどのようにするつもりか。

ビームダンプの内側へのモニター設置は避け、外部に振動センサーや温度モニターを設置する、循環水の水质をモニターすることなどが検討されている。窓の交換については、J-PARCのビーム標的交換などの遠隔操作で実績のあるシステムを参考にし、窓を組み込んだ真空パイプを交換するなど、工程の最適化を検討している。

日本学術会議 (2018/10/02)

23

ビームダンプの健全性のモニター、遠隔操作による窓の交換はどのようにするつもりか。(2)

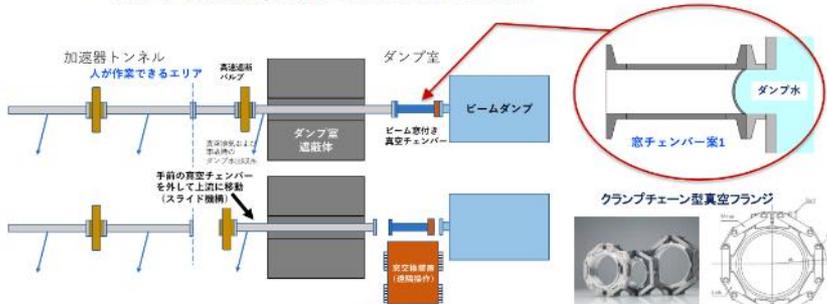
窓の交換については、J-PARCのビーム標的交換などの遠隔操作で実績のあるシステムを参考にし、窓を組み込んだ真空パイプを交換するなど、工程の最適化を検討している。

- 窓を組み込んだ短い真空チャンバーを外部で組み上げる
  - ・ 現場での作業の簡略化
  - ・ 窓部分の止水・真空封止機能の確認(導入前試験が可能)

■ 窓交換装置(遠隔操作)

- ・ チェンバー搬送・位置合わせ
- ・ フランジ締め付け/取り外し: クランプチェーン方式など

詳細設計の項目  
 ・ 窓材(Ti合金)の接合・構造  
 ・ 真空とダンプ水の封じきり  
 ・ フランジ構造



日本学術会議 (2018/10/02)

ビームダンプの健全性のモニター、遠隔操作による窓の交換はどのようにするつもりか。(1)

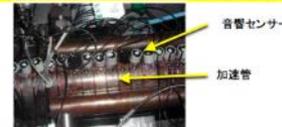
■ ビームダンプの内側へのモニター設置は避け、外部に振動センサーや温度モニターを設置する、循環水の水质をモニターすることなどが検討されている。

システムの健全性を確認すること、異常の兆候を捉えることを目的とした監視システムを構築する。原子力や工業プラントなど、類似する特殊分野の専門家(JAEA, AAA参加企業など)の協力を得ながら進めるべきものと考えている。

■ ダンプ容器本体の健全性

- 温度測定
- 振動測定 ... 通常時との違いなどから異常の兆候を得たい例) 音響センサー、加速度センサー、レーザー光を用いた振動センサーなど

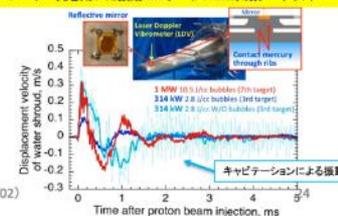
音響センサーの応用: 加速器(常伝導)における放電の研究: KEK



■ ビーム窓、真空パイプ側の健全性

- 真空度測定
- 漏水検出

レーザー光を用いた振動モニター(J-PARC水銀ターゲット)



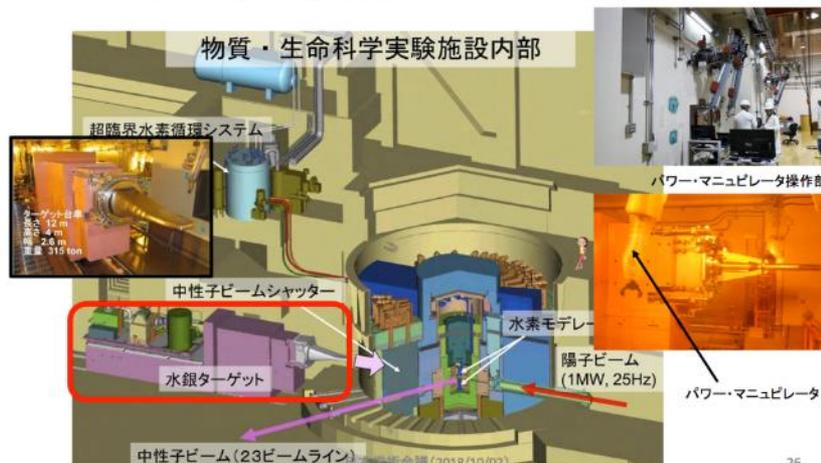
■ ダンプ水循環システムの健全性

- 漏水検出、湿度測定
- 温度、圧力、流量測定
- 電気伝導度、pH、酸素濃度、水素濃度
- トリチウム濃度(定期サンプリング)
- ...

日本学術会議 (2018/10/02)

参考: J-PARC 1MW水銀ターゲット導入装置

- 遠隔操作にて装置全体が直進する(差し込む)。
- 真空フランジはボルトで締め付け(パワー・マニピュレータを使用)



26