

ILC ビームダンプ設計

BEAM DUMP DESIGN OF INTERNATIONAL LINEAR COLLIDER

森川祐^{A)}, 奥木敏行^{A)}, 照沼信浩^{A)}

Yu Morikawa^{A)}, Toshiyuki Okugi^{A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

Beam dumps are essential components of any accelerator system. The ILC (International Linear Collider) has 15 beam dumps. The beam energy incident on the electron/positron beam dump has a range from 5 GeV to 125 GeV, and the average beam power has a range from 60 kW up to 5.3 MW. In addition to electron/positron beam dumps, there is a photon dump that stops undulator light for positron creation, and it receives photons up to 300 kW. Convective water, graphite and aluminum alloy are adopted as the beam absorber according to the beam heat load. In the design, we use the Monte Carlo code (FLUKA) for the evaluation of beam heat and radiation damage. The finite element analysis software (ANSYS) is used for the evaluation of temperature distribution and thermal stress. In this paper, overview of ILC beam dumps is reported.

1. はじめに

ILC(国際リニアコライダー; International Linear Collider)にはビームを安全に吸収・冷却する装置であるビームダンプが全体で15基あり、受け入れるビーム特性に合わせて様々なビームダンプが設計されている。

電子・陽電子用ビームダンプでは入射するビームエネルギーは5 GeV から最高 125 GeV まで幅があり、ビームパワーも 60 kW から最大 5.3 MW まで想定している。また電子・陽電子以外に陽電子生成用のアンジュレーター光を止めるフォトンダンプがあり、最大 300 kW の光子を受ける。ビーム吸収体はビーム熱負荷に応じて、対流させた水やグラファイト、アルミニウム合金が適用される。

これらビームダンプ設計においては主にシミュレーションを通して構造の最適化を進めている。ビーム熱や放射線ダメージの評価には高エネルギー放射線と物質の相互作用を評価するモンテカルロ計算コード(FLUKA)を利用し、このビーム熱分布を用いて汎用有限要素解析ソフト(ANSYS)で温度分布や熱応力の評価を行っている。

今回は ILC ビームダンプの設計概要を報告する。

2. ILC ビームダンプの概要

ILC 全体におけるビームダンプの配置を Fig. 1 に示す。全 15 基のビームダンプの内、大半はビーム調整用か非常時のビームアポート用のビームダンプであり、通常運転時には E-5, E+5, E+7, E-8 の 4 基のみ使用する。

2.1 ビーム吸収体の材料選定

Table 1 に ILC ビームダンプ全体の概要を示す。ILC ビームダンプの設計はビームパワーや用途に応じて6つに分類できる。ILC ビームダンプではビーム熱負荷に応じてビーム吸収体を水、グラファイト、アルミニウム合金と使い分けている。水を吸収体とした場合は、対流させることで高い熱輸送能力を実現できるが、水自体の放射化や放射線分解に伴い発生する水素を管理する必要がある。グラファイトは低原子番号素材であるためビーム発熱密度は小さくなるが、さらに高融点かつ低ヤング率、低線形熱膨張率を有するため高い熱負荷に耐える。しかし、酸化や放射線ダメージに伴う物性変化への対策が必要となる。アルミニウム合金の場合は比較的低原子番号素材かつ熱伝導率も良好ではあるが、水やグラファイトに比べて高いビーム熱負荷は受けられない。一方で、上述の放射化物の取扱いや酸化等の課題も緩和され、装置としては簡易化される。以上の観点で、耐ビーム熱負荷性能と装置全体の簡易化のバランスを考慮しながらビーム吸収体の材質を選んでいる。

2.2 入射ビームへの要求

多くのハイパワービームダンプの場合、入射ビームは事前にビームサイズを広げるかビーム走査をしなければ、ビーム発熱密度が高くなりビームダンプの損傷に繋がる。ビームサイズ調整やビーム走査の必要性は主に繰り返し疲労と運転温度の観点で決められる。

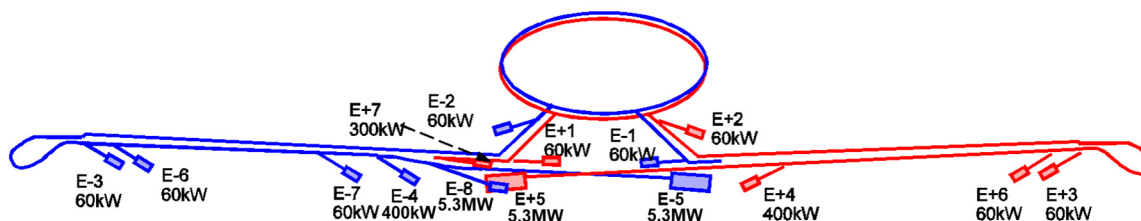


Figure 1: ILC layout and beam dump position. E-(1~8) are electron line dump. E+(1~7) are positron line dump.

Table 1: Overview of ILC Beam Dumps

Category of Dump	Al-5GeV	Al-15GeV	Gr-125GeV	Gr-Abort	Photon Dump	Water Dump
Location	E-1,E-2,E-3 E+1,E+2,E+3	E-6,E+6	E-4,E+4	E-7	E+7	E-5,E+5,E-8
Purpose of Dump	Tuning	Tuning	Tuning/ Beam abort	Only beam abort	Photon beam abort	Final beam abort
Core Absorber (Absorber size: cm)	Aluminum alloy (φ10×L100)	Aluminum alloy (φ10×L120)	Graphite (φ20×L400)	Graphite (φ20×L400)	Graphite or Water	Water (φ180×L1100)
Acceptable Beam Parameters						
Beam Energy	5GeV	15GeV	125GeV	125GeV	Average 8MeV	125GeV
Charge per Bunch Train	1.2μC	420nC	1.6μC	8.4μC	/	8.4μC
Energy in Bunch Train	6.0kJ	6.3kJ	200kJ	1.1MJ		60kJ
Average Beam Current	12μA	4μA	3.2μA	/	Photon flux 2.5 × 10 ¹⁷ /sec	33.6μA
Average Beam Power	60kW	60kW	400kW		300kW	5.3MW
Beam Preparation						
Beam Size at Dump Entrance: $\sqrt{\sigma_{x,min}\sigma_{y,min}}$	>5mm	>5mm	>2mm	>2mm	5mm @2km away from Positron Target	>0.65mm
Beam Sweeping	None	None	Slow Sweep (Rs=4cm)	None	None	Fast Sweep (Rs=6cm)
Heat Load						
Peak Longitudinal Power: dP/dz	1kW/cm	890W/cm	1.9kW/cm	/	Graphite:3kW/cm Water:1.9kW/cm (120kW Beam)	50kW/cm
Peak Energy Deposition Density per Bunch Train	30J/g	32J/g	230J/g	2010 J/g	Graphite:50J/g Water:110J/g (120kW Beam)	219J/g
Maximum Temperature in Operation: T _{max}	250°C	225°C	700°C	1400°C	Graphite:1000°C Water:50°C (120kW Beam)	140°C

繰り返し疲労はバンチトレイン毎に誘起される熱応力に起因する。ビーム発熱分布が円筒対称でありビーム軸方向のみの熱膨張を仮定した場合、1バンチトレイン当たり許される温度上昇 $\text{tol}(\Delta T_{inst})$ は疲労限度応力 σ_u を用いて下記(1)式のように求められる。

$$\text{tol}(\Delta T_{inst}) = (1 - \nu) \cdot \frac{\sigma_u}{\alpha E} \quad (1)$$

ここで ν はポアソン比、 α は線形熱膨張率、 E はヤング率である。ただし、 σ_u はアルミニウム合金やグラファイトの S-N 曲線における繰り返し数 10^9 の値を採用する。この場合 σ_u はアルミニウム合金で 80 MPa、グラファイトの引張強度で 30 MPa 程度である。これらの値を用いると $\text{tol}(\Delta T_{inst})$ はアルミニウム合金で 32 □、グラファイトで 240 □となる。ビーム発熱密度ではアルミニウム合金で 32

J/g、グラファイトで 240 J/g が許容限度となる。

運転上限温度は軟化温度や結晶転移温度、グラファイトの場合は酸化速度の温度依存性などの観点から決められる。他研究機関の設計指針や運用状況を参考に、アルミニウム合金では 250 °C、グラファイトでは 800 °C 以下を設計指針とした。円筒形ビームダンプの場合、ビームダンプの最高温度 T_{max} は下記(2)~(4)の近似式で見積もることができる。

$$T_{max} = T_{cool} + T_{steady} + T_{inst} \quad (2)$$

$$T_{steady} \approx \frac{dP/dz}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{R}{\sigma_r} \quad (3)$$

$$T_{steady} \approx \frac{dP/dz}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{R}{R_s} \quad (4)$$

ここで T_{cool} は吸収体の冷却温度、 T_{steady} は吸収体の時間平均温度、 T_{inst} はバンチトレイン当たりの温度上昇である。また dP/dz はビーム軸に沿った発熱総量 Longitudinal Power (W/cm) であり、 λ は吸収体の熱伝導率、 R は吸収体の円筒半径、 σ_r はビームサイズではなくビーム軸横断面の発熱分布の RMS サイズを示す。Rs は円形ビーム走査をした場合の走査半径である。(3)式はビーム走査無しの場合の近似式であり、(4)式は円形にビーム走査をした場合のものである。

これらの式を用いるとダンプ分類 [Al-5GeV]、[Al-15GeV] の 60 kW ダンプにビーム走査は必要ないが、[Gr-125GeV] の 400 kW ダンプにはビーム走査が必要となることから分かる。また [Gr-125GeV] では 1 バンチトレインの熱負荷には耐えられるため、ビーム走査は数 Hz 程度の低速度で十分である。[Gr-abort] はアンジュレーター等のビームライン保護用のビームダンプであり、緊急時のみ使用する。このダンプでは 1 バンチトレインの熱負荷を受けても十分に融点を下回るようにビームサイズを調整する。[Water Dump] では dP/dz が最大 50 kW/cm に達し、固体吸収体を採用したビームダンプでは冷却が難しいことが分かる。[Photon Dump] においても、ビームパワーは最大 300 kW であるが、平均ビームエネルギーが 8 MeV と低いため電磁シャワーは吸収体表面に偏在してしまい、グラフィイトに入射させた場合の dP/dz は最大 3 kW/cm にも達する。その一方で、光子ビームであるためにビーム走査も出来ないため、運転温度の上昇を抑えるのが難しい。次節より、[Water Dump] と [Photon Dump] の設計概要を示す。

3. Water Dump の設計

ILC ビームダンプの中でも最大のビームパワーを受けるのは、ビームライン最下流に設置されるメインビームダンプである (Water Dump : E-4, E+4)。リニアコライダーは、主線型加速器の拡張による高エネルギー化が可能であり、将来の可能性として最大ビームエネルギー 500 GeV、ビームパワー 17 MW に耐えられるよう設計されている。Water Dump の基本設計はスタンフォード線形加速器センター (SLAC) にてビームパワー 2.2 MW 用に開発された水ダンプ [1] の経験を基にして作成された [2]。現在は高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で周辺施設も含めた詳細設計を進めている。

3.1 Water Dump の構造

Figure 2 に Water Dump の構造を示す。Water Dump では、内径 1.8 m × 奥行 11 m の円筒容器に 1 MPa に圧縮された水を満たし、ビーム窓をとおしてビームを入射させる。水を 1 MPa に加圧することで、沸点を上昇させて水の沸騰を防ぐとともに、ビーム熱により発生する圧力波でキャビテーション (水中での負圧状態) が起こらないようにしている。また入射ビームは発熱密度を下げるために半径 6 cm の円周上に走査される。本体の円筒容器内には 2 本の冷却水供給用のパイプがあり、渦状の対流を生成するようにそれぞれ反対方向に流速 2.17 m/sec の水を放出する。冷却水回収用のパイプは 1 本あ

り、円筒容器の中心軸に位置する。また、ビーム入射部であるビーム窓は円筒容器前面に中心軸から 35cm 上に設置されている。

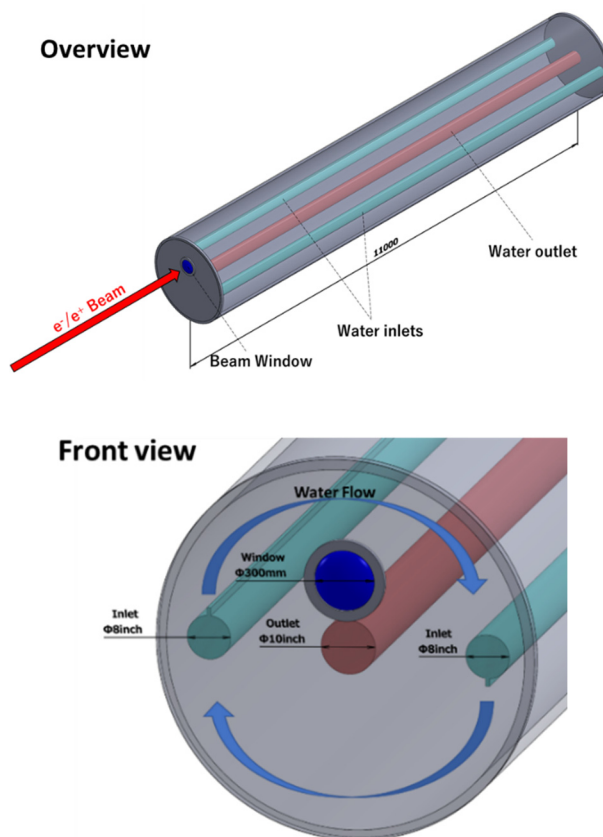


Figure 2: Structure of water dump.

3.2 水中でのビーム発熱

Figure 3 は FLUKA で計算した Water Dump でのビーム発熱の評価結果である。ビーム条件は将来のエネルギー増強の可能性も想定した最大負荷であるビームエネルギー 500 GeV かつビームパワー 17 MW である。Figure 3(a) は鉛直 (Y) 軸断面でみた 1 バンチトレイン分のビーム発熱分布である。ビーム (Z) 軸に沿ってビームは進み、電磁シャワーの発展にともないビーム熱が広がっていく。Figure 3(b) は Z 軸に沿った最大発熱密度と Longitudinal Power (dP/dz) を示している。最大の発熱密度は水にビームが入射してから 180 cm のところで生じ、その値は 1 パルス当たり 220 J/cm³ に達する。一方で dP/dz が最大となるのはビーム入射後 290 cm の地点であり、50 kW/cm の発熱がある。

3.3 Water Dump 中の水温評価

Figure 4 は流体解析コード ANSYS-FLUENT を用いて 17 MW ビーム入射時の水温分布を 2 次元解析した結果である。Figure 4 に示しているのは dP/dz が最大とな

る地点であり、最高温度はここで観測される。最高温度は 140 °C であり、1 MPa に圧縮された水の沸点は 180 °C であることから、通常運転が維持されている限り沸騰のリスクはない。

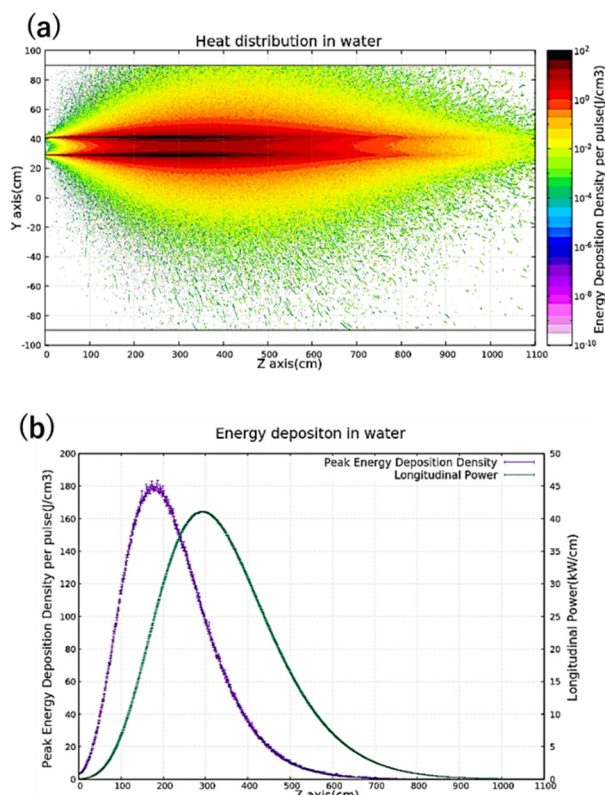


Figure 3: Energy deposition of water dump.

- (a) Contour of beam heat distribution in water.
- (b) Peak energy deposition density and longitudinal power in water.

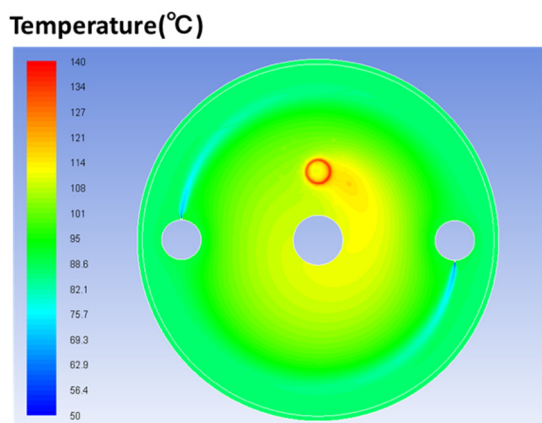


Figure 4: Temperature Distribution at the time when the bunch train completes.

4. Photon Dump の設計

光子ビームの発熱密度は高く、この発熱密度を下げるためにフォトンダンプは陽電子標的から 2 km 離れた位

置に設置される予定である。フォトンダンプの設計には 2 つの候補があり、1 つは固体材料中では熱負荷に強いグラファイトを使ったもの[3]、もう 1 つは熱輸送能力の高い水を使ったもの[4]がある。Figure 5 はこれら 2 方式の基本構造を示す。

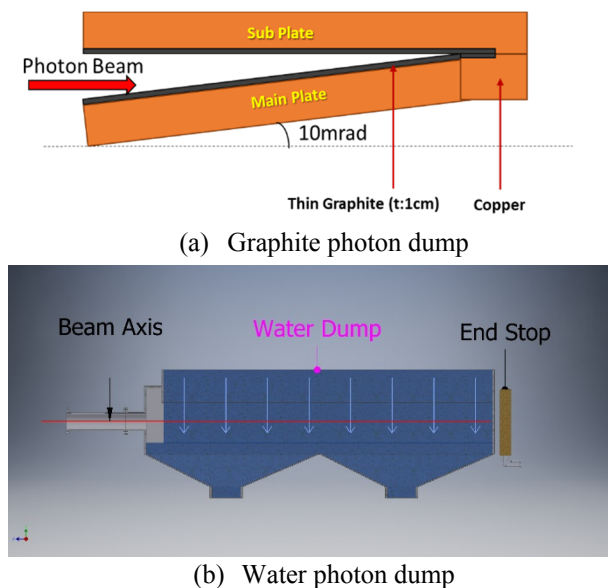


Figure 5: Base structure of photon dump.

4.2 Graphite Photon Dump

Figure 5(a)はグラファイト型のフォトンダンプの基本構造を示している。この設計ではグラファイトを 10mrad 傾けることで光子ビームの実効ビームサイズを広げる。この傾斜をつけたグラファイトは背面で銅プレートと接合され、銅プレートを介して冷却される。運転温度はグラファイトの熱伝導率に大きく依存し、放射線ダメージにより熱伝導率が 10 W/(m・K)まで劣化した場合、最高温度は 1000 °C 程度まで上昇する。グラファイトへの放射線ダメージへの対策は必要だが、後述の水を吸収体としたフォトンダンプと違いビーム窓が必須ではない。

4.3 Water Photon Dump

グラファイト案よりも先に水を吸収体とした方式も提案されている[4]。Figure 5(b)は提案されている水を利用したフォトンダンプの基本構造である。この方式では上方より水を流し、流れ落ちる水にビームを入射させる。水温の上昇はバンチトレイン当たりの昇温分しかなく、水の最高温度は 50 °C 程度となる。この設計の場合、上流にビーム窓が必須となり、チタン合金による 2 重構造のビーム窓が設計されている。ビーム窓の厚みは 300 μm 程度を想定しており、最大流速 100 m/sec の He ガスでビーム窓を冷却する。また、ビーム窓への放射線ダメージを緩和するため、ビーム窓自体を半径 3 cm の円を描くように回転させるなど対策が必要である。

5. まとめ

ILC ビームダンプ設計では、受け入れるビーム特性に

合わせて水やグラファイト、アルミニウム合金をビーム吸収体としたビームダンプが設計されている。基本的な耐熱設計の概要は本報告の Table 1 のとおりであり、今後は実機試験等により設計の詳細検討や妥当性の確認を進めていく予定である。またビームダンプの耐熱設計以外に、現在はメンテナンスや放射線防護を考慮した付帯施設の設計を進めている。

参考文献

- [1] R.B. Neal Ed, SLAC 2.2MW Water Dump, The Stanford Two-Mile Accelerator, 1968.
- [2] P. Satyamurthy *et al.*, “Design of an 18MW vortex flow water beam dump for 500GeV electrons /positrons of an international linear collider”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 679 (2012).
- [3] Y. Morikawa, “A Photon Dump Study for ILC Undulator Positron Source”, LCWS2017.
- [4] P. Sievers *et al.*, “Primary Vacuum Window and Water Dump for the ILC-Photon Beam”, LCWS2016.