



500kV-10mA電源の製作状況と ビームダンプの基本設計

原子力機構 ERL-Gr.

永井良治、羽島良一、西森信行、
飯島北斗、沢村勝、菊澤信宏

ERLとDC電子銃(電源)

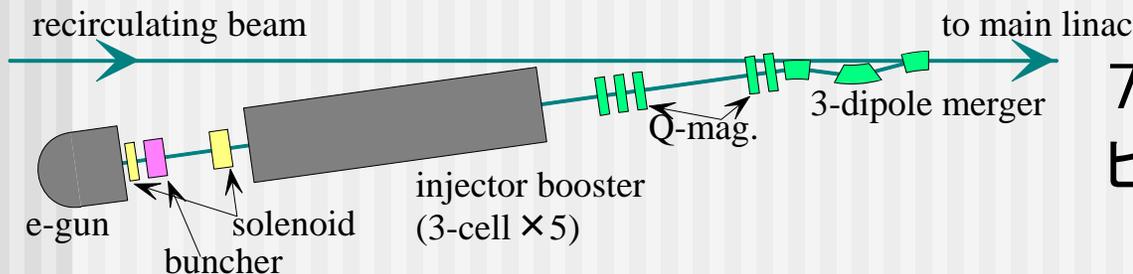
- 超伝導加速器(CW運転) + NEA-GaAs
→ (現状の技術では) DC電子銃が最適

- DC電源に求められる性能
 - ・電圧・電流、安定度(リップル、ドリフト)、
大きさ、保守の容易さ

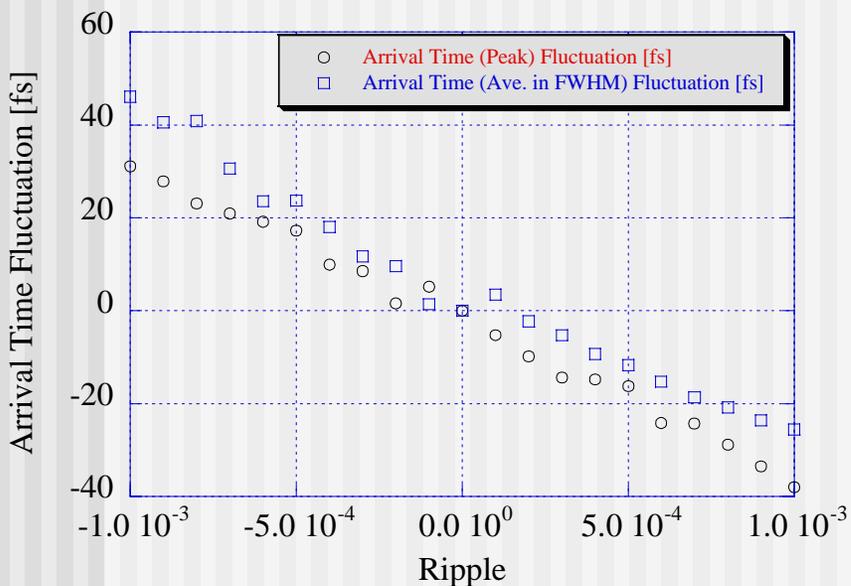
- DC電源としてCockcroft-Walton型を採用
他には Schenkel、Van de Graaff、Dynamitoron、
Disktron、ICT

電子銃電圧リップルの影響

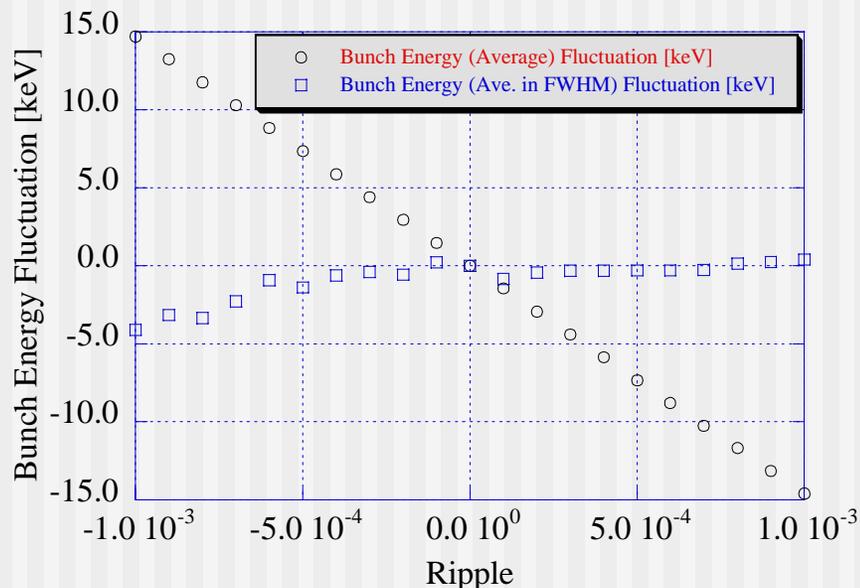
主加速器下流でのビーム変動の計算



70MeVの位置での
ビームの評価



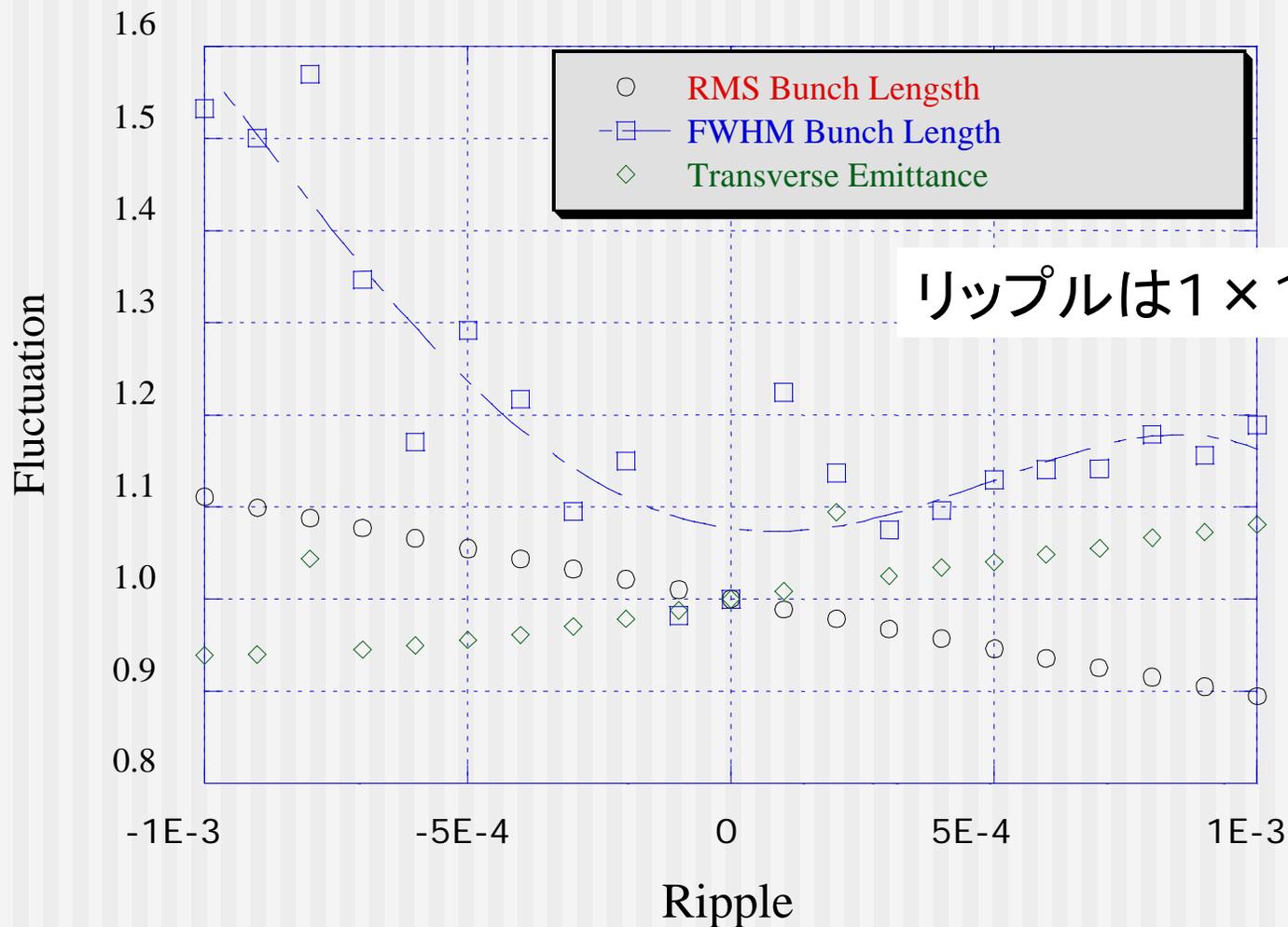
バンチ到着時刻



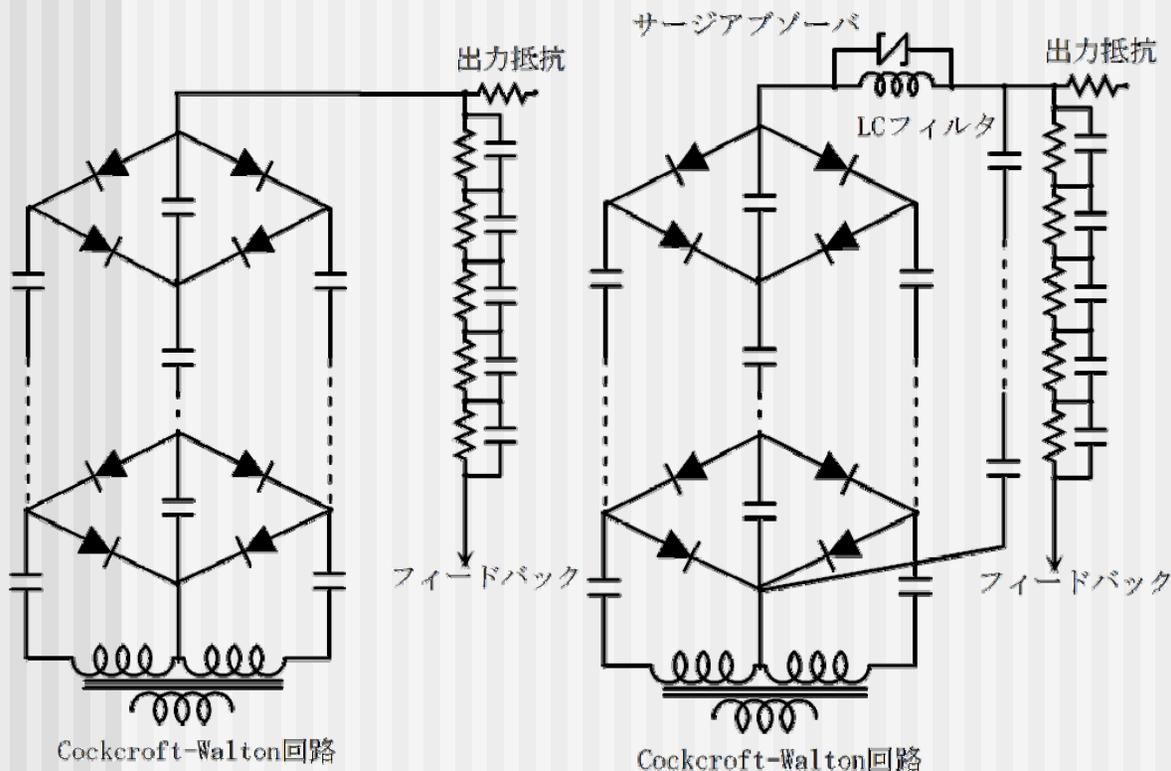
バンチ平均エネルギー

電子銃電圧リップルの影響

主加速器下流でのビーム変動の計算



Cockcroft-Walton回路の高安定化



従来型

改良型

$$\delta V = \frac{I}{2fC} \cdot n \quad [V]$$

↓
リップルを小さくするには大きな静電容量が必要

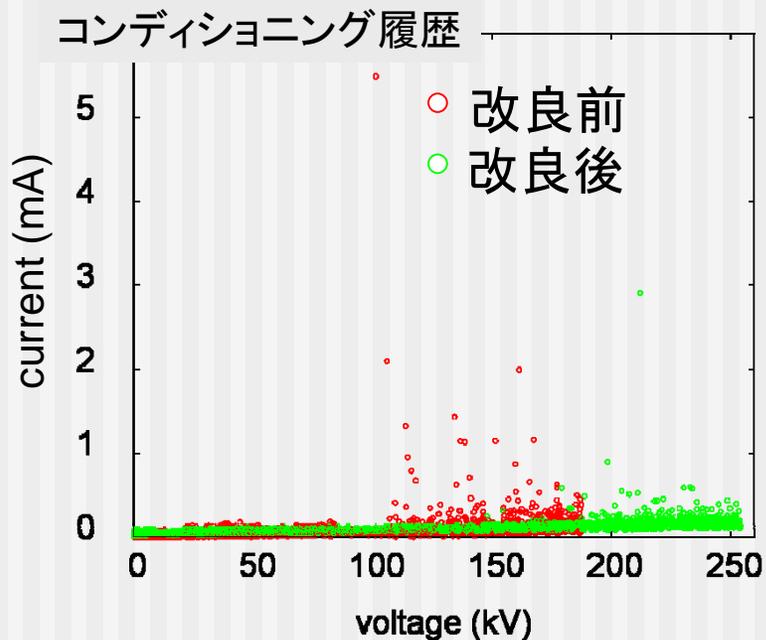
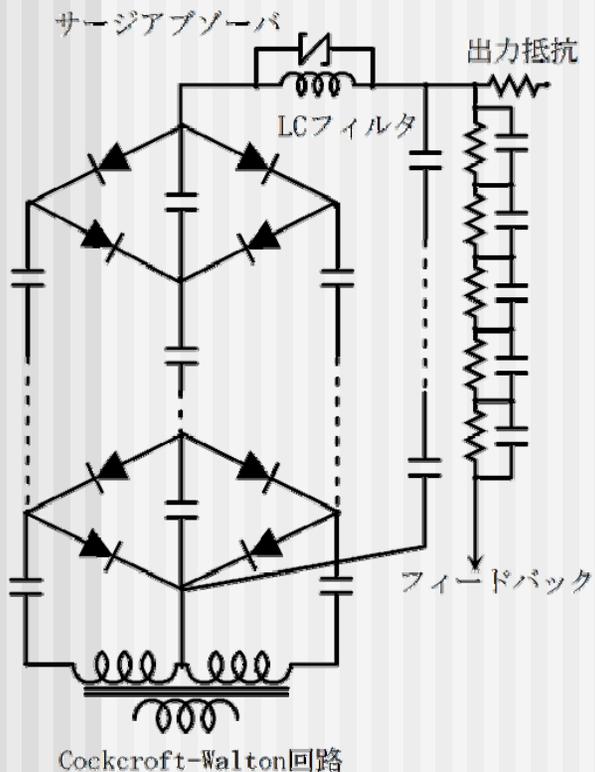
↓
LCフィルタで小型・高安定化

LCフィルタの減衰率は

$$R = 1 / (4\pi^2 f^2 LC)$$

駆動周波数を上げることでさらに減衰できる

Cockcroft-Walton回路の高安定化 250kV電子銃で成功



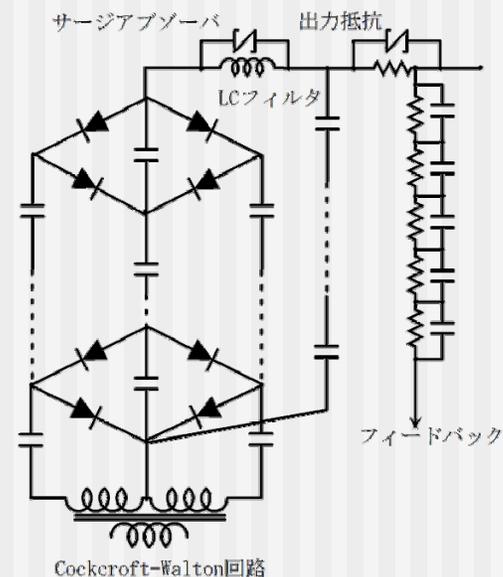
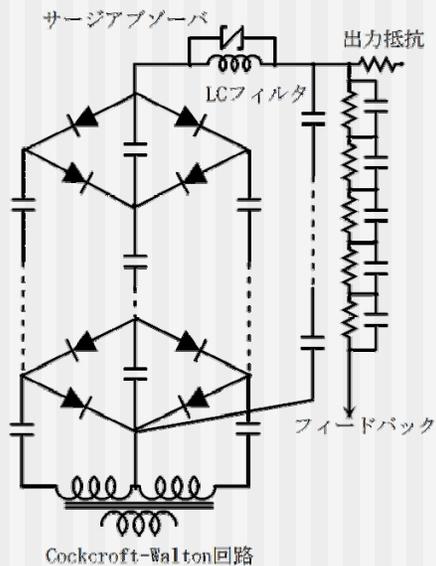
出力抵抗、サージアブゾーバ、LCフィルタの最適化

Cockcroft-Walton回路の高安定化 100mAへ向けて

	250kV-50mA	500kV-10mA	500kV-100mA
駆動周波数	20 kHz	40 kHz	40 kHz
各段静電容量	8.4 nF	2.4 nF	8.4 nF
段数	6	12	12
フィルター L	1.2 H	2 H	2 H
フィルター C	1.4 nF	0.2 nF	0.7 nF
リップル(計算値)	1.4×10^{-4}	4.8×10^{-5}	4.0×10^{-5}
リップル(実測値)	1.9×10^{-4}		

250kV-50mAの直径で12段(500kV-10mA)にすることでOK!

Cockcroft-Walton回路の小型化



出力抵抗(耐電圧)が大きい

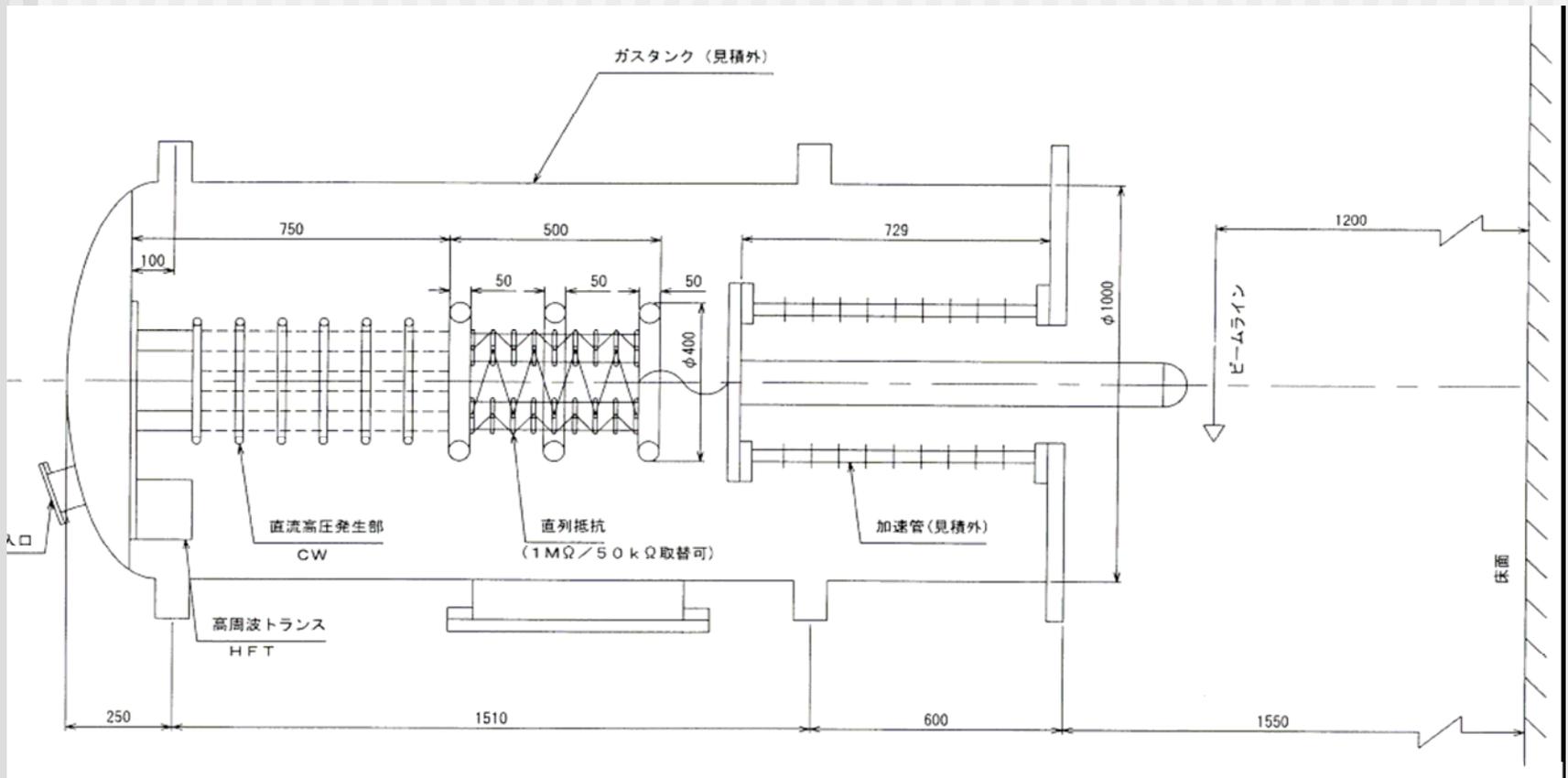


サージアブゾーバで小型化



絶縁タンクの小型化

500kV電子銃(高電圧部)の構成



サージアブソーバ

Panasonic

“ZNR[®]” サージアブソーバ(Dタイプ)

“ZNR[®]” サージアブソーバ

Dタイプ Vシリーズ

“ZNR[®]” サージアブソーバDタイプVシリーズは、新開発のZnO系セラミックバリスタ材料の導入及び製造工法の改善により、サージ電流耐量・エネルギー耐量などサージパルス吸収能力を大幅に向上、小形化・高性能化を実現した製品です。



■ 特長

- 小形形状で大きなサージ電流耐量
- 大きなエネルギー耐量
- 低電圧回路から世界各国のAC電源に対応する幅広いバリスタ電圧範囲
- 本カタログ記載の標準品は、以下の規格認定を取得しています
 - バリスタ電圧 82~150 V: UL, VDE
 - バリスタ電圧 200 V以上: UL, CSA, VDE
 - (規格認定品の詳細については、P.101~P.102を参照ください)
- RoHS指令適合製品

■ 規格取得

- UL1414, UL1449
 - CSA C22.2 No.1 Class 2221 01
 - VDE CECC42000, CECC42200, CECC42201, IEC61051
 - type designation, part number, style referenceは品番では登録されていません
- 安全規格の登録を行う場合の、type designation, part numberについてはP.101を参照ください

■ 主な用途

- 半導体素子（ダイオード、トランジスタ、サイリスタ、ICなど）の保護
- 民生用電子機器の保護
- 産業用電子機器の保護
- 通信、計測、制御装置の保護
- 配電線自動制御装置の保護
- モータ、リレー、電磁バルブの開閉サージ吸収

■ 取り扱い上の注意事項 114~116頁を参照ください。

■ 包装仕様 147頁を参照ください。

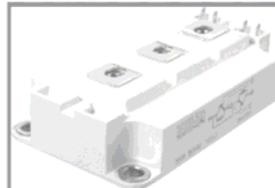
放電によるサージから
部品を保護、
回路の小型化、

サージエネルギーの
見積もりが鍵

IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)

- MOS-FET (高速スイッチ) とバイポーラトランジスタ (低オン抵抗) の長所を併せ持つ素子
- 高速 (20kHz以上) で動作できる素子がでてきた

SKM 300GB125D



SEMITRANS™ 3

Ultra Fast IGBT Module

SKM 300GB125D

Preliminary Data

Features

- N channel, homogeneous Silicon structure (NPT - Non punch-through IGBT)
- Low inductance case
- Short tail current with low temperature dependence
- High short circuit capability, self limiting
- Fast & soft inverse CAL diodes
- Isolated copper baseplate using DCB Direct Copper Bonding Technology
- Large clearance (10 mm) and creepage distances (20 mm)

Typical Applications

- Switched mode power supplies at $f_{sw} > 20$ kHz
- Resonant inverters up to 100 kHz
- Silent AC motor speed control

Absolute Maximum Ratings		$T_c = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified	
Symbol	Conditions	Values	Units
IGBT			
V_{CES}		1200	V
I_C	$T_c = 25 (80)^\circ\text{C}$	300 (210)	A
I_{CRM}	$T_c = 25 (80)^\circ\text{C}$, $t_p = 1$ ms	600 (420)	A
V_{GES}		± 20	V
$T_{vj} (T_{stg})$	$T_{OPERATION} = T_{stg}$	-40 ... +150 (125)	$^\circ\text{C}$
V_{ISOL}	AC, 1 min.	4000	V
Inverse diode			
I_F	$T_c = 25 (80)^\circ\text{C}$	260 (180)	A
I_{FRM}	$T_c = 25 (80)^\circ\text{C}$, $t_p = 1$ ms	600 (420)	A
I_{FSM}	$t_p = 10$ ms; sin.; $T_j = 150^\circ\text{C}$	2200	A

Characteristics		$T_c = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified			
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
IGBT					
$V_{GE(ON)}$	$V_{GE} = V_{CE}$, $I_C = 8$ mA	4,5	5,5	6,5	V
I_{CES}	$V_{GE} = 0$, $V_{CE} = V_{CES}$, $T_j = 25 (125)^\circ\text{C}$		0,1	0,3	mA
$V_{CE(TO)}$	$T_j = 25 (125)^\circ\text{C}$		1,5 (1,7)	1,75	V
r_{CE}	$V_{GE} = 15$ V, $T_j = 25 (125)^\circ\text{C}$		9 (11,5)	10,5	m Ω
$V_{CE(SAT)}$	$I_C = 200$ A, $V_{GE} = 15$ V, chip level		3,3 (4)	3,85	V
C_{ies}	under following conditions		18	24	nF
C_{oes}	$V_{GE} = 0$, $V_{CE} = 25$ V, $f = 1$ MHz		2,5	3,2	nF
C_{res}			1	1,3	nF
L_{CE}				20	nH
R_{CC+EE}	res., terminal-chip $T_c = 25 (125)^\circ\text{C}$		0,35 (0,5)		m Ω
$t_{d(ON)}$	$V_{CC} = 600$ V, $I_C = 200$ A		130		ns
t_r	$R_{Qon} = R_{Qoff} = 3 \Omega$, $T_j = 125^\circ\text{C}$		40		ns
$t_{d(OFF)}$	$V_{GE} = \pm 15$ V		460		ns
t_f			30		ns
$E_{on} (E_{off})$			16 (11)		mJ

Inverse diode			
$V_F = V_{EC}$	$I_F = 200$ A; $V_{GE} = 0$ V; $T_j = 25 (125)^\circ\text{C}$	2 (1,8)	2,5
$V_{(TO)}$	$T_j = 125 ()^\circ\text{C}$	1,1	1,2
r_T	$T_j = 125 ()^\circ\text{C}$	3	5,5
I_{FRM}	$I_F = 200$ A; $T_j = 125 ()^\circ\text{C}$	340	A
O_{rr}	di/dt = 8000 A/ μ s	46	μ C
E_{rr}	$V_{GE} = 0$ V	13,6	mJ

Thermal characteristics			
$R_{\theta(j-c)}$	per IGBT	0,075	K/W
$R_{\theta(j-c)D}$	per Inverse Diode	0,18	K/W
$R_{\theta(j-c)}$	per module	0,038	K/W

500kV-10mA電源、製作工程

- 回路設計(終了)
- 実空間での部品配置設計(～1月末)
- 部品調達(～1月末)
- 組立て(～2月末)
- 調整(～3月中旬)
- 立会い試験(3月中旬)
- 納品(3月末)

大電流ビーム源(加速器)とビームダンプ

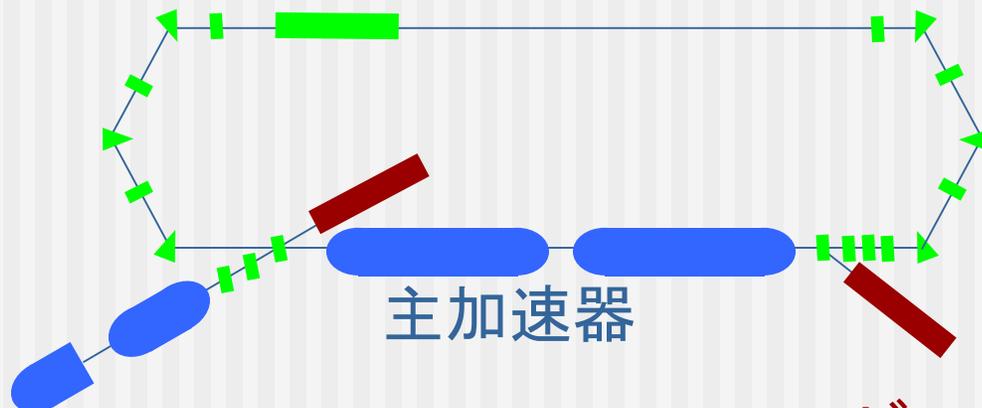
- **大電流ビーム試験:**

安全にビームをダンプできるビームダンプが必須

- **配慮すべき項目:**

除熱、放射線、真空、インターロック、ビームダイナミクス

CERLでのビームダンプの検討例



入射器:
5-10MeV × 100mA

ビームダンプ:
5-10MeV × 100mA

CERLでのビームダンプの検討例

ビームダンプの材質

■ 中性子発生閾値

炭素(グラファイト): 18.72MeV

アルミニウム: 13.03MeV

銅: 9.91MeV

■ 熱伝導率

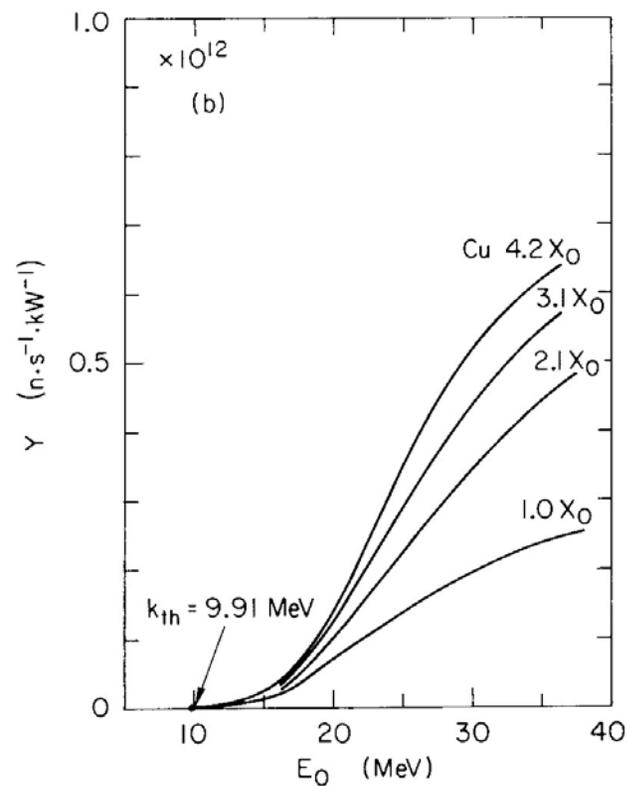
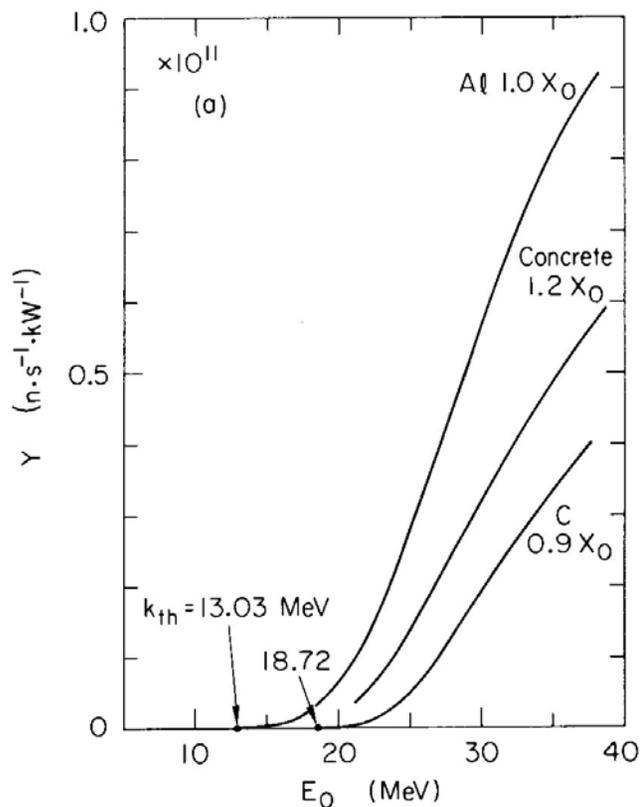
炭素(グラファイト): c軸方向は低く、形状による

アルミニウム: 273W/m·K

銅: 398W/m·K

CERLでのビームダンプの検討例

中性子発生閾値



- 10MeV程度までなら銅でOK？

CERLでのビームダンプの検討例

ビームダンプの形状

- 円錐形
 - ← 面積を大きくするため
- 冷却水配管により除熱
- ビームダンプを真空チャンバー内に入れる
 - ← リークの可能性があるのでビームダンプでの水や真空の封止はしない

CERLでのビームダンプの検討例

ビームダンプの形状

- 厚み：電子の飛程の5割り増し
 - ← 厚くしすぎると除熱で損をする
- パイプの径と長さ(10φ、70ℓ/min、5m)
 - ← 径が細かい方が熱伝達係数を大きく出来る
 - ← 長さはポンプと圧損を考慮

CERLでのビームダンプの検討例

単純なモデルによる見積もり

- 図のような単純なモデルで必要面積の見積もりを行う

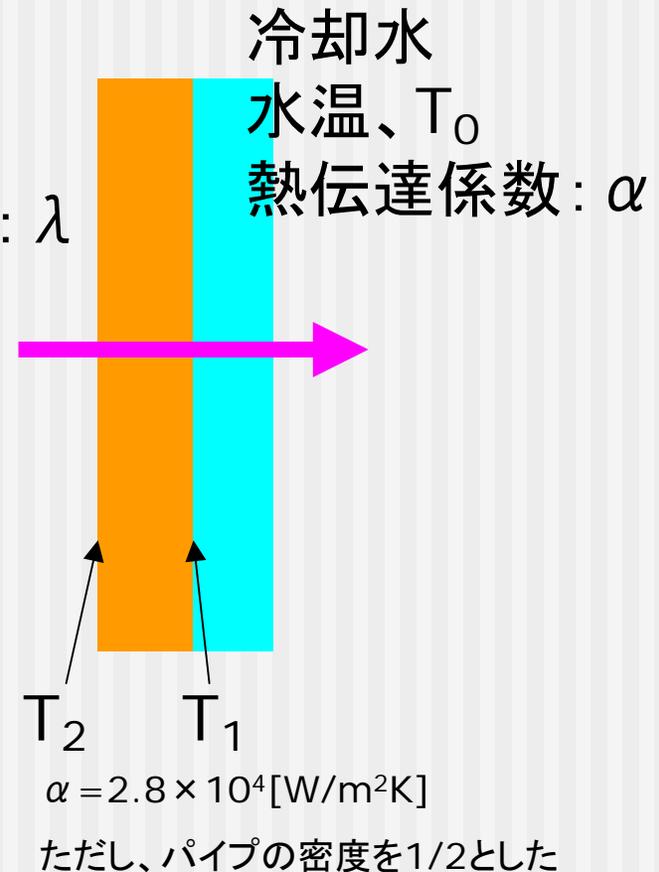
$$q = \alpha (T_1 - T_0)$$

$$T_2 - T_1 = q \cdot \Delta L / \lambda$$

の関係から条件: $T_0 = 30^\circ\text{C}$ 、 $T_2 \leq 80^\circ\text{C}$ を満たす熱流束を求める。

ダンプ
厚さ: ΔL
熱伝導率: λ

熱流束, q



CERLでのビームダンプの検討例 見積もりの結果(銅について)

■ 100mA、5MeVの場合

$q \leq 98 \text{W/cm}^2$ → 面積 $\geq 5000 \text{cm}^2$
円錐直径: 25cm、長さ: 約1.3m

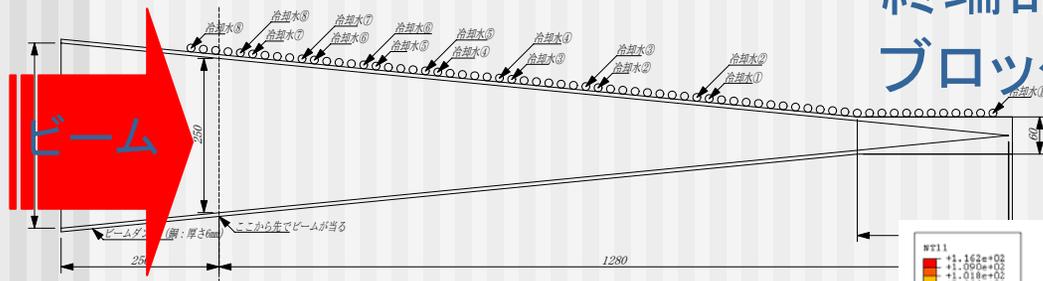
■ 100mA、10MeVの場合

$q \leq 82 \text{W/cm}^2$ → 面積 $\geq 12200 \text{cm}^2$
円錐直径: 25cm、長さ: 約3.1m

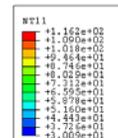
CERLでのビームダンプの検討例 ABAQUSでの計算(銅、5MeV)

冷却水配管は5m × 8本

終端部分は
ブロック状に



冷却水温度変化を考慮して
繰り返し計算



最高温度は入り口付近内面で116.2°C
パイプ内面の最高温度は80°C程度



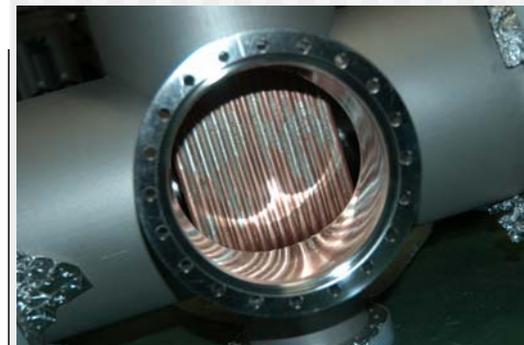
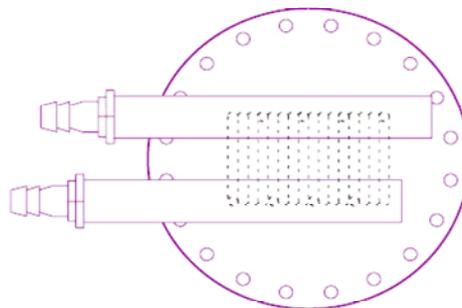
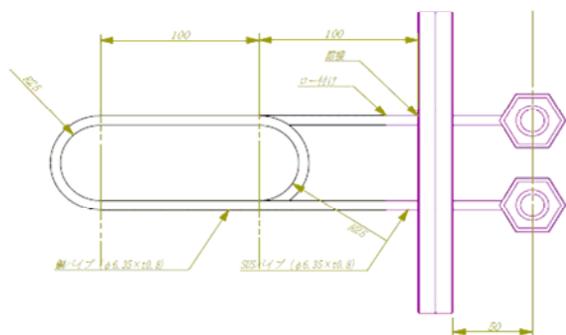
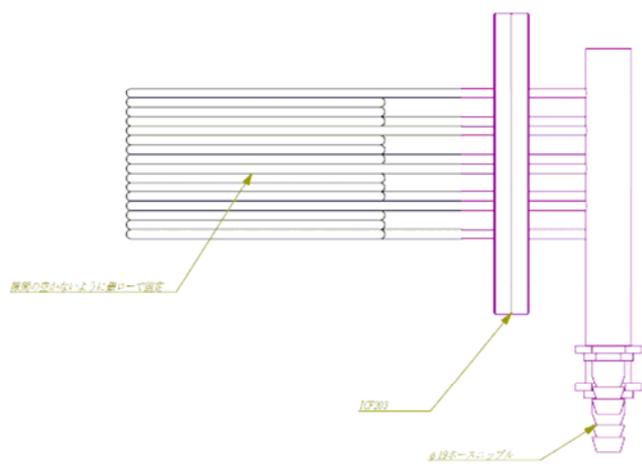
ODB: Job-1.odb ABAQUS/Standard 6.4-1 Tue Aug 30 09:45:07 GMT+09:00 2005

Step: heat_step
Increment: 1; Step Time = 1.000
Primary Var: NT11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.012e+02

500kV-10mAのビームダンプ 形状および材質

- エネルギーが低く(電子の飛程が短い)、ビーム電力も小さい(ダンプに穴を開ける危険性が低い)ので冷却水を流した銅パイプに直接ビームをぶつける形状を採用
- 経験的に容易に除熱できる熱流束は約 $100\text{W}/\text{cm}^2$ であるので、ビーム面積は約 50cm^2 (半径4cm) でOK

500kV-10mAのビームダンプ 形状および材質



1/4インチ銅パイプに直接ビームを当てる

500kV-10mAのビームダンプ 圧力損失の見積もり

チラーの能力は流量35ℓ/min. × 揚程35m

パイプは内径4.75mm × 長さ1.8m

一本当りの流量は8.75ℓ/min.

レイノルズ数: $Re = \rho u D / \mu = 39090 > 2300$ なので乱流

ファニングの式により圧力損失: $\Delta P_f = 2fLu^2 / (\rho D) = 0.296 \text{MPa}$

ただし、管摩擦係数: $f = 0.0626 / [\log((e / (3.7 D)) + (5.74 / Re^{0.9}))]^2$ を用いた



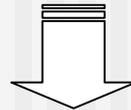
銅パイプの圧力損失はチラーの揚程以下なのでOK!

500kV-10mAのビームダンプ 熱伝達係数の見積もり

無次元特性値ヌッセルト数は $Nu = \alpha D/\lambda$ で定義される
乱流範囲 ($Re > 2300$) ではヌッセルト数は次式で求められる。

$$Nu = \frac{\{\xi/8 (Re - 1000) Pr\} \{1 + (D/L)^{2/3}\}}{\{1 + 12.7 (\xi/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)\}}$$

ただし、 Re :レイノルズ数、 Pr :プラントル数、
 $\xi = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2}$ である。



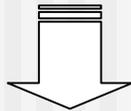
従って、熱伝達係数: $\alpha = 33623 \text{ W/m}^2\text{K}$

500kV-10mAのビームダンプ 最小ビーム径の見積もり

$$q = \alpha (T_1 - T_0)$$

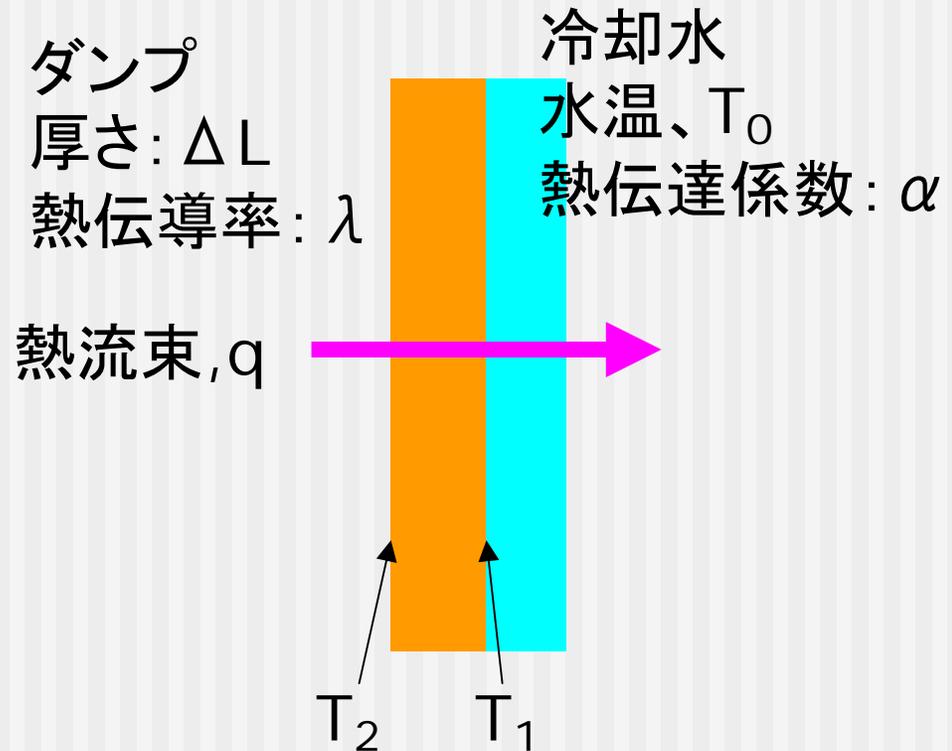
$$T_2 - T_1 = q \cdot \Delta L / \lambda$$

条件: $T_0 = 30^\circ\text{C}$ 、 $T_2 \leq 80^\circ\text{C}$

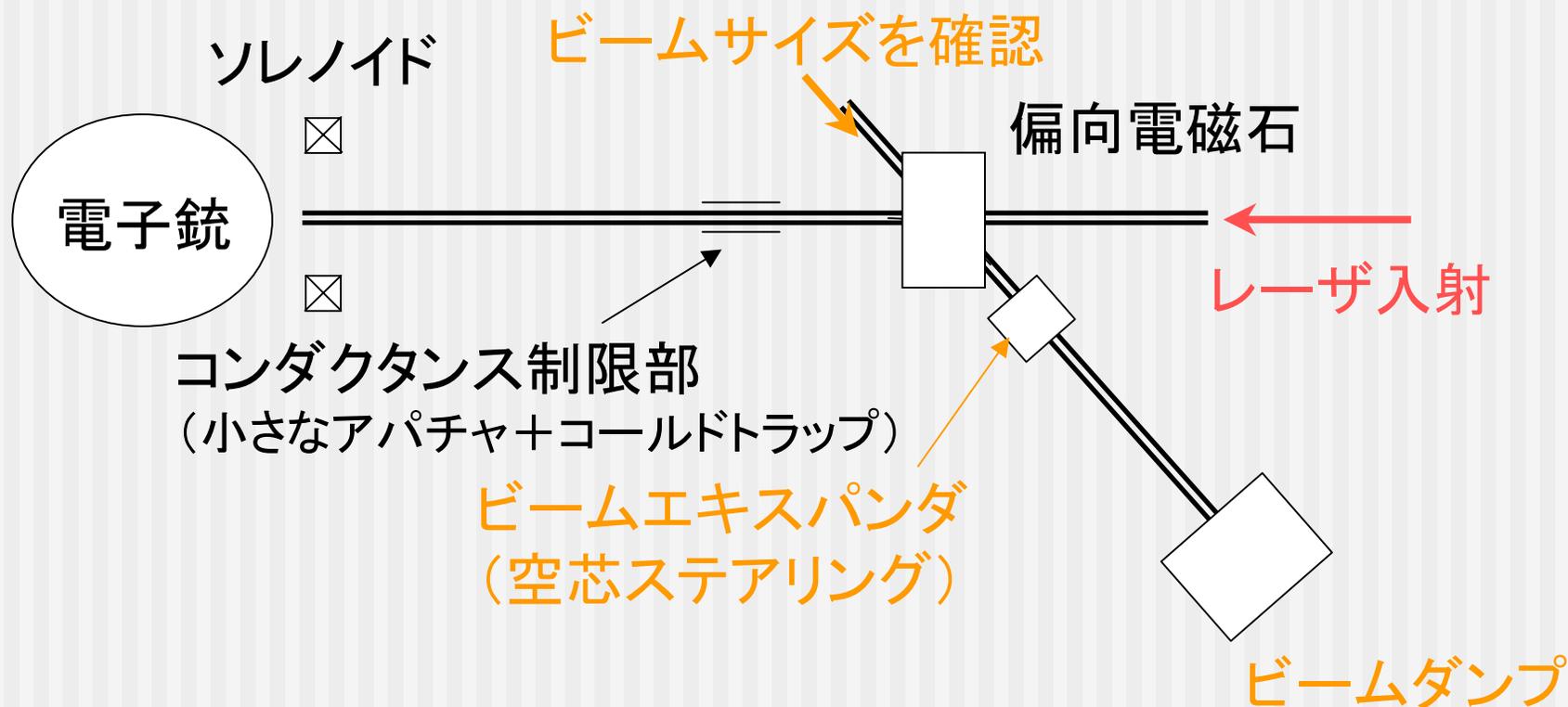


最大熱流束: $154\text{W}/\text{cm}^2$

最小ビーム直径: 6.4cm



500kV-10mAのビームダンプ ビームラインの構成(寿命計測)



ダンプ上でのビームサイズの確認方法？

- ・YAGを銅パイプ上に成膜することを検討中