

H⁰ ダンプ CT の設計

荒川 大

高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

大強度陽子加速器の 3 GeV RCS リング (rapid-cycling synchrotron) では 40ms ごとのサイクルで約 8.3×10^{13} 個の陽子を入射する。RCS では炭素薄膜を用いた荷電変換入射が行なわれ、荷電変換効率は 99.7% 程度の高効率が予想されているが、計算上変換しきれない粒子は 1 サイクルあたり 2.4×10^{11} 個にも及ぶ。ここで荷電変換しきれない粒子数は KEK-PS-BOOSTER から取り出されるビーム強度の約 1 割強に匹敵するため、周回軌道から外れた場所で荷電変換して H⁰ を陽子に変換し、H⁰ ダンプに粒子を導いて処分する設計になっている。

H⁰ ダンプに導かれる粒子数は炭素薄膜の状態が悪化するとさらに増加することが予想される。RCS の効率良い運転、及び H⁰ ダンプと周辺機器の放射化抑制には H⁰ ダンプラインに於いてビーム強度を測定し、炭素薄膜の状態を把握することが不可欠である。

H⁰ ダンプラインのビーム強度測定方法の 1 つとして現在設計開発段階にある H⁰ ダンプ CT について報告する。

尚、リニアック出力ビームのエネルギーは 181MeV と 400MeV の 2 種類が予想され、本来は各運転パラメーターに対する最適解を探るべく解説すべきであるが、本論文では混乱を避けるため 400MeV 入射に焦点をしばって論ずることにする。

1. H⁰ ダンプラインのビーム信号

リニアックから RCS 向けに入射されるビームは図 1 に示す様な時間構造を有する。[1]

リニアックからの入射ビーム (400MeV 入射時)

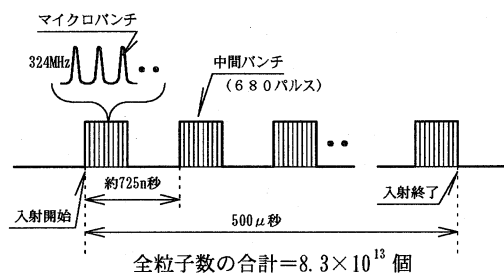


図 1 ビーム信号の時間構造

RCS では入射時間幅 500 μ 秒の間に 680 パルスの中間バンチが 2 つの加速高周波 (RF) パケットに振り分けられ、積み上げられて入射される。しかし、H⁰ ダンプラインにおけるビーム強度はリニアックからのビームの 0.3% 程度であり、RCS 内の周回ビームと異なり One pass である。

H⁰ ダンプ CT 中を通過する中間バンチ 1 バンチあたりの粒子数は 3.5×10^8 個、500 μ 秒間の平均電流換算では 76 μ A、中間バンチのピーク電流換算では 160 μ A 程度の微弱電流が測定対象となる。

2. 放射線および雑音環境

RCS 入射タイミングでは入射のためのパルス電磁石に大電流が流れている。また、入射終了直前の周回ビームはピーク電流 17A に達する高周波電流であるため電磁波を発生する。これらが雑音源となることが想定されるので、CT の出力を直接伝送処理して十分な S/N 比の信号が得られるほど良好な雑音環境は得られないであろう。信号が微弱な場合、検出器直後で増幅してから伝送することが不可欠であるが、検出器設置場所の放射線環境を考慮すると放射線損傷によって半導体が放射線損傷を受けることが予想されるため、半導体増幅器の設置は避ける必要がある。

そこで H⁰ ダンプ CT では真空管で増幅器を作って対応する方針にした。

3. 検出器 (CT) の設計方針

H⁰ ダンプ CT の検出器は高感度に設計する必要がある。

ここで K = 感度、 V_0 = 出力電圧、 I_b = ビーム電流、 N = CT の巻き数、 R_L = 負荷抵抗値、とおく。

CT を理想トランスと仮定し、通過帯域内における入出力を考えると (1) 式の関係が成り立つ。

$$K = V_0 / I_b = R_L / N \quad (1)$$

又、トロイダルコアに巻き線を施した場合、自己インダクタンス = L 、真空の透過磁率 = μ_0 、コア材の比透磁率 = μ 、コアの外径 = b 、コアの内径 = a 、コアの厚さ = t 、コアの定数 (AL 値) = A_L とおくと、 L は (2) 式で表される。[2]

$$L = \mu \mu_0 t N^2 \ln(b/a) / (2\pi) = A_L N^2 \quad (2)$$

ここで低域時定数 τ は (3) 式である。

$$\tau = L / R_L \quad (3)$$

CT は DC を通過させないため出力には必ずドゥループを生じ、ビーム強度測定に影響を与える。ドゥループの影響を 1% 程度に抑えるために τ は最低でも測定時間幅の約 100 倍程度必要である。図 1 より中間バンチの測定に必要な時間幅を 725ns とすると、 τ は約 72 μ 秒以上必要となる。これを低域遮断周波数 f_L に換算すると約 2KHz までの帯域を必要としているのと同値である。[3]

時定数を保ちつつ感度を増やすためには (1)、(2)、(3) 式のすべてを考慮しながら各数値を決定する必要がある。各パラメーター間の関係は多少複雑なので、 R_L を既知とした場合と、 A_L を既知とした場合に分けて高感度にする条件を考えると理解しやすい。

R_Lを既知の値とした場合

R_Lを既知（一定の値）とした場合（3）式よりLを一定以上に保てばτが必要な時定数を確保できる。（1）式よりNを減らした方が高感度となる。従って（2）式のLを保ったままNを減らす条件は下記の3項目になる。

- ①μの大きなコア材を選択する。
- ②コアの内径は必要最小限にする。
- ③コアの長さ、および外径は大きくする。

上記3項目にはそれぞれの限界があり、その理由は下記のとおりである。

- ①μが大きい材料の入手には限界がある。
- ②H⁰ダンプリン線のビームパイプのフランジ外径は450mmであり、検出器組み立ての手順から考え、CTのコイルは巻き線を施し絶縁処理後の仕上がり寸法でフランジ外径を越える大きなコアを必要とする。
- ③コアの長さ、及び外径は大きくなるほど製作コストはかかるし、重量も重くなるため現実的には限界がある。

A_Lを既知の値とした場合

使用するコアを決定すると（2）式のA_Lが決まる。

（1）（2）（3）式から（4）、（5）式が導出される。

$$K = A_L N / \tau \quad (4)$$

$$R_L = A_L N^2 / \tau \quad (5)$$

（4）式よりKはNと比例関係となり、この時R_Lは（5）式である。

ここでCTの高域遮断周波数について言及する。

高域遮断周波数 = f_H、浮遊容量 = C_S、とすると（6）式で表される。

$$f_H = 1 / (2 \pi R_L C_S) \quad (6)$$

Nを多くすることによって、Kを大きくすると、巻き線長が長くなりC_Sの増大につながる。それに加え（5）式の条件からR_Lが増大したことで（6）式より求められるf_Hはさらに低下する。f_Hは測定に必要な周波数以上でなければならないためNを大きくするには限界がある。

以上2つの場合分けをしてCTの高感度化をする条件を模索したが、画期的な性能向上をもたらすパラメーターはないことがわかる。そこで現実可能な大きさのCTを設計して、それでも出力電圧が小さい場合には増幅器を用いる必要がある。現設計段階のCTの設計値は表1のとおりである。尚、磁性体のμは熱処理や取り扱いや機械的ストレス等によっても2倍～3倍程度の変化が有るため、μのばらつきと同程度の余裕を持った設計とした。

名称	記号	数値
負荷抵抗	R _L	500Ω
トイダコリア内径	a	470mm
トイダコリア外径	b	570mm
トイダコリア厚さ	t	75mm
コイル巻き数	N	20回
コア比透磁率	μ	150,000

自己インダクタンス	L	0.038 [H] ~ 0.115 [H]
低域時定数	τ	7.6 × 10 ⁻⁵ 秒 ~ 0.23m 秒
低域遮断周波数	f _L	700Hz ~ 2KHz、
占積率		約 0.66
低域時定数余裕		3.1 倍
磁性体重量、		約 28kg

表1 H⁰ダンプCT（検出器）設計値

図2に現在考案中のH⁰ダンプCTの図面を示す。

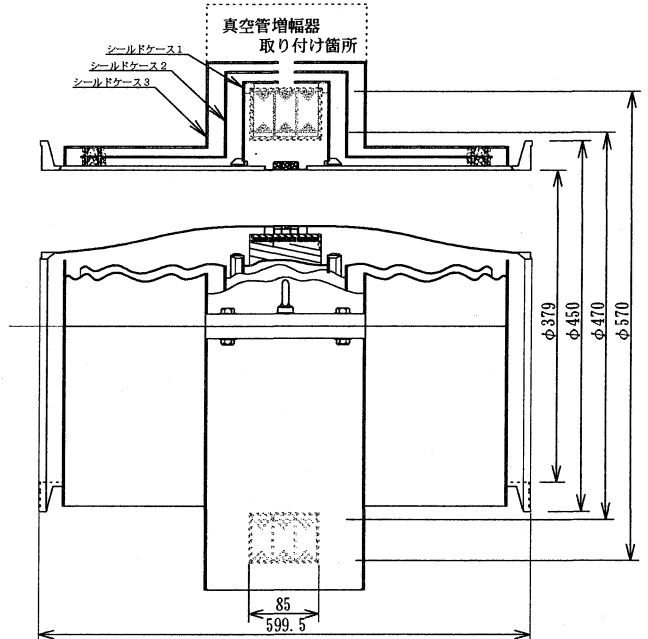


図2 H⁰ダンプCTの図面（案）

以上のパラメーターを元にCTを製作した時の感度は25V/Aで、加速器設計通りのビーム強度で運転した場合には4mV程度の出力を見込むことが出来る。

ここでCTの高域特性に言及するが、ビームのパンチ波形を忠実に再現するためには無限に高い周波数までの検出が必要となるが、このCTの目的はビーム強度の概略の値の測定であることから考えるとRF周波数の5倍波程度（6.8MHz程度）までの測定を行ない、さらにビームを模擬したパルス電流で校正作業を行なえば実用になると思われる。検出器の浮遊容量は検出器を製作して測定するまで不明なパラメーターであるが、（6）式より逆算すると、真空管増幅器の入力容量と、巻き線の浮遊容量を合わせて40pF程度に抑える必要がある。もし、浮遊容量が大きく、十分な高周波特性が得られない場合には負荷抵抗を下げ、巻き数を減らすなど、感度を多少犠牲にして対処する必要がある。

4. 真空管増幅器

H⁰ダンプCTの信号増幅はCTの帯域と同様、2kHzから7MHzまでの広帯域を平坦性を保ちつつ増幅しなければならない。現在試験中の真空管増幅器を電力増幅部と出力ドライバー回路の2つに分けて解説する。

4-1. 電圧増幅部

真空管をカソード接地増幅器として使用する場合、電圧増幅度 $=G_v$ とし、プレート負荷抵抗 $=R_p$ 、相互コンダクタンス $=g_m$ 、とおくと(7)式で表される。

尚、厳密には内部損失も考慮しなければならないが R_p が数十k Ω 以下の場合には内部損失をほぼ無視して計算できる。[4][5]

$$G_v = g_m \times R_p \quad (7)$$

g_m は真空管の種類とプレート電流等によっても変わるが、通常 $2\sim 5\text{ m}\Omega^{-1}$ 程度である。[5][6]

負荷抵抗 R_p を大きくすれば電圧増幅度は大きく出来るが、真空管の出力には5pF~10pF前後静電容量がある。

さらに多段増幅器にする場合は初段の負荷となる2段目の真空管の入力容量も加算される。

R_p を大きくして増幅度を大きくすると高域遮断周波数が低下する。このため電圧増幅部1段では感度を大きくすることができないため、 H^0 ダンプ CT 用として実用的な増幅度を得るためには回路を多段にする必要がある。

現在のところ1段のみを組み立てて試験中であるが、実機では4~5段重ねて使用したいと考えている。現段階における試作品の電力増幅部は、図3に示す様な構成となっており R_p は750 Ω (初段プレート抵抗1.5k Ω 、2段目入力抵抗1.5k Ω)として1段あたり10dB程度の電圧増幅を行なっている。

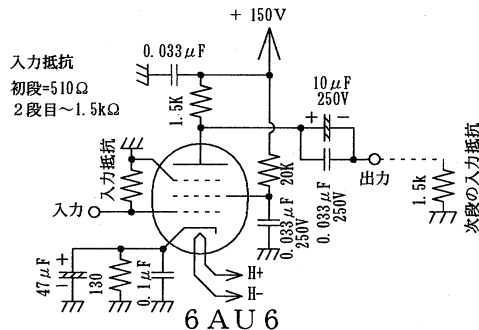


図3 電圧増幅部回路図

4-2. 出力ドライバー回路

一般の真空管増幅器ではカソード接地回路のプレートからトランスを介して出力が駆動される。しかし、2KHz~7MHzまでの広帯域に渡って平坦な特性を持ったトランスの製作は非常に困難である。そのため広帯域増幅器ではカソードフォロア回路を使ってインピーダンス変換して出力される。カソードフォロアは電圧増幅率が1以下となり、内部抵抗は g_m の逆数程度、即ち200 Ω ~数百 Ω 程度になる。内部抵抗が大きいために50 Ω 系の高周波同軸ケーブルで信号伝送すると損失が大きく、信号が1/5程度に減衰してしまう。

損失の抑制策としては75 Ω 系同軸ケーブルによる信号伝送を考えている。さらに現試作段階では図4に示す様、双3極管を用いて実質上2個の真空管で出力を駆動することで内部抵抗の影響を低減させているが、それでも入力電圧振幅の1/4程度の出力電圧(75 Ω 負荷)であるため現在より良い回路を模索中である。

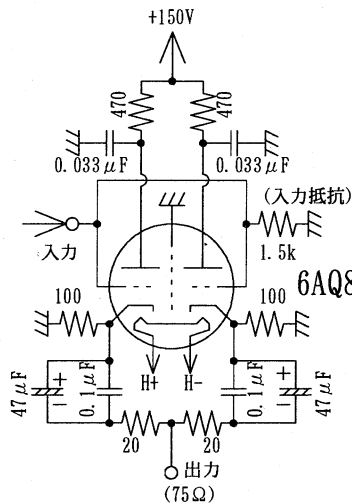


図4 出力ドライバー回路図(開発中:暫定版)

増幅度の最終目標は50dB程度であるが、段数が著しく増えると保守作業時の作業性悪化が懸念される。

そこで現段階では真空管増幅器の増幅度の目標値を25~30dB程度に妥協し、増幅度の不足分を10mほど離れた放射線レベルの低い場所(サブトンネル)に半導体増幅器(20dB程度)を設置して、1V程度まで増幅した信号を伝送して観測しようと考えている。

まとめ

実現性のある範囲内で高感度のCTの設計を行った結果4mV程度の信号しか見込むことができないことがわかり、CTと直結した増幅器が必要なことがわかった。増幅器の放射線対策として真空管を増幅素子として用いることで現在は実用化を目指している。雑音環境など、現在のところ未知の部分があるため不安要素は残るが、今後は実機製作及び実用化に向け努力する。

謝辞

真空管増幅器設計にあたりご指導いただきました KEK 加速器第4研究系助教授の二宮重史氏に感謝致します。

又、真空管に関して新刊の本が入手しにくい中、貴重な資料を長い間貸して下さいました KEK 技術部の染谷宏彦氏に感謝致します。

参考文献

- [1] Accelerator Group JAERI/KEK Joint Project Team, Accelerator Technical Design Report For J-PARC, KEK Report 2002-13, JAERI-Tech 2003-044, J-PARC03-01,
- [2] 山村英穂 著 トロイダル・コア活用百科 CQ 出版
- [3] D.Arakawa, Beam Intensity Monitor for 500MeV Beam Transport Line at KEK Proton Synchrotron (in Japanese), KEK Internal 93-9 November 1993
- [4] 霜田光一 著 エレクトロニクスの基礎 昭和53年第22版
- [5] 復刻版ナショナル真空管ハンドブック 誠文堂新光社
- [6] 実用真空管ハンドブック 誠文堂新光社
- [7] S.Hiramatsu, et al., Beam Intensity Monitor for KEK Proton Synchrotron (in Japanese), KEK-77-21 February 1978