

Study on Water Cooling of an Annular-Coupled Cavity for the JHP 1 GeV Proton Linac

Kazuo YOSHINO, Tatsuya KAGEYAMA,
Yuichi MOROZUMI, Yoshishige YAMAZAKI

National Laboratory for High Energy Physics, KEK

ABSTRACT

A high-power model of the Annular-Coupled Structure (ACS) has been developed for the high- β coupled-cell accelerating structure of the JHP 1 GeV proton linac. Study on water cooling of the ACS cavity has been made. This note shows the recent results of heat analysis on the ACS cavity, including numerical calculations with the ISAS codes (a three dimensional solution program).

Annular-Coupled Structure の冷却

はじめに

大型ハドロン計画 (JHP) の入射器として、1 GeV 陽子リニアックを想定しており、その最終段である高 β 加速空洞 (1296 MHz) は、150 MeV で入射し 1 GeV まで加速するものであり、本リニアックの大部分を占めるため、その性能は非常に重要である。従って本リニアックがデューティーの高い加速器という点も考えると rf 壁面損失による熱応力の問題も空洞の性能に大きな影響を与えるので、冷却に関しても詳細に考慮する必要が出てくる。

現在、開発が進められている高 β リニアックの $\pi/2$ モード Coupled-Cell 型加速構造の有力な候補として ACS (Annular Coupled Structure) 型加速空洞が上げられるが、ACS は図 1 のように加速空洞の周囲に環状の結合空洞が取り巻いた構造をしているため、円筒型の空洞と比べて外径が大きくなり (ACS で約 40 cm) 形状も軸対称でなくなるため、発熱壁面と外周の温度差が大きくなり温度分布も一様でなくなってくる。

以下の節では、ACS ハイパワーモデル ($\beta = 0.8$) 用に種々の水路を想定した場合の 2 次元軸対称 5 セルのモデル、及び 3 次元単セルのモデルについて熱-構造解析した結果を述べ、次にその結果から周波数のずれを求め、それらの点を踏まえた上で、各々の冷却法についての考察を述べることにする。

冷却水路の熱-構造解析例

空洞の冷却を考える場合、冷却水路をどのように取るかが問題になるが、まず外周部分に、ビーム軸に平行な冷却水路を設けた場合 (Model-A) [昨年の本研究会で報告済みなのでその図を参照]^[1] とディスクの部分まで冷却する場合 (図 2: Model-B, Model-C) の 3 モデルについての熱解析を、3 次元構造解析コード ISAS 2 (Integrated Structure Analysis System 2) を使って行な

った。解析に際しては、流れは定常で線形・圧力降下は無視・物性値は一定、と仮定した。冷却に関するパラメーターを表 1 に、解析に際しては水は 26.5°C で、銅は OFC-CLASS 1 の物性値を使用した。

発熱量	1 KW/セル
冷却水量	5 Liter/min/セル
冷却水入口温度	25.0 °C
冷却水出口温度	28.0 °C

表 1 冷却に関するパラメーター

まず Model-A について、2 次元軸対称 5 セルの場合、境界条件を外周面 30°C として熱伝導のみで解析した。その等温度線図を図 3 に示す。その結果、最高温度は加速セル中央部のノーズコーン先端部で約 55°C であり温度差 25°C、変形量は、円周方向が加速セル中央部で 26.0 μ m 膨張し、ビーム軸方向は加速セル端部で 24.9 μ m 開いた。等温度線図 (図 3) を見ると温度分布・変形が端セルに向かうほど一様でなくなっているが、これは、エンドセルで結合空洞がない分、熱が拡散したせいだと考えられる。

Model-A は実際には、ビーム軸に平行な水路であり熱伝達係数を考慮して 3 次元の熱解析を行なった。その結果、最低温度は冷却路表面で 33°C、最高温度は加速セル中央部のノーズコーン先端部で約 68°C であり熱伝導による温度差 35°C となった。

つぎにディスク部冷却の Model-B について、2 次元軸対称 5 セルの熱伝達解析をしたが、最も冷える水路及び流量の条件で解析してみた。従ってこのモデルのみ流量は約 5 倍の 24 L/min/cell とし、軸対称で近似した熱伝達係数を計算して解析した。その等温度線図を図 4 に示

す。それによると最高温度は加速セル中央部のノーズコーン先端部で、約27.6℃であり温度差約1.1℃、変形量は数μm程度でほとんど変形していない。等温度線図を見ても分布が一様であり、歪もほとんど同程度の値を示している。従って、ディスク部の冷却がかなりの効果を上げることがわかったので、Model-Bについて3次元の熱伝達解析を試みた。解析条件はModel-Aの3次元解析と同様だが、汚れ係数(0.0001 m²h^{0.5}℃/kcal)を考慮した場合も同時に行なった。その結果、汚れ係数を含まない場合、最低温度は28.7℃で最高温度は38.3℃であり温度差9.6℃、汚れ係数を含む場合、最低温度は30.1℃で最高温度は41.1℃であり温度差11.0℃となり、汚れ係数を含んで、最高温度で7%、温度差で11%の上昇となった。共にModel-Aと比べて温度上昇が3分の1以下に押さえられているので、ディスク冷却が実際に効果があることが確認できた。

さらに、水路の構造を、対称性を失わずできるだけ均等に冷える様に考えたのがModel-Cであり、実際に最も冷えることが期待できる構造となっている。まずModel-Cの2次元熱伝達解析は、表1の条件で解析してみた。

水路は、Model-Bと同様に軸対称で近似して解析した。その等温度線図を図5に、変形量を図6に示す。それによると最高温度は、加速セル中央部のノーズコーン先端部で約30.5℃で、最低温度は27.3℃であり温度差約3.2℃、変形量は、円周方向が加速セル中央部で4.2μm膨張し、ビーム軸方向は端セルの加速セルディスク間で4.2μm開いた。又、温度分布は、ほぼ一様であり、エンドセルへの歪の偏りも多くはない。

つぎにディスク冷却が3次元の熱伝達-構造解析を試みた。解析条件は表1の条件と同様である。その結果、最低温度は27.2℃で最高温度は30.3℃であり温度差3.1℃、変形量は円周方向が加速セル中央部で3.9μm膨張し、ビーム軸方向は加速セルのディスク間で6.4μm開いた。従って、2次元モデルの解析結果とほぼ同様であり、近似したαの計算値が正しかったことが分かった。結果は、Model-Aと比べて温度上昇が10分の1以下に押さえられ、Model-Bとは3分の1以下に押さえられており、最も冷却効果のある構造であることが確認できた。

熱変形による周波数のずれ

Model-A及びModel-Cの2次元軸対称モデルの変形量から、周波数のずれΔfをSUPERFISHで算出した。またModel-Cに関しては、3次元モデルからのΔfも求めた。その結果を表2に示す。

表2のModel-Cの場合、3次元モデルのΔfに関しては、片面が拘束をうけないで熱膨張した変形なので、ろう付けしたモデルより変形量が大きいと考えられ、そのΔfも、やや大きくなっていると考えられる。2次元モデル

では周波数のずれが±100KHz以内におさまっており、結合セルに関しては±50KHz以内におさまっているため、冷却に関しては、ACSの実用化のめどが確認できた。

2次元軸対称モデル	加速セル			結合セル	
	NO-1	NO-2	NO-3	NO-1	NO-2
Model-AのΔf [KHz]	-510	-230	-290	-310	-90
Model-CのΔf [KHz]	-80	-80	-70	-50	-40
3次元モデル		加速セル		結合セル	
Model-CのΔf [KHz]		-110		-40	

表2 熱変形による周波数のずれ

考察

Model-Aは、長所として、水路が直線状になるので、空洞と水路が一体型で製作できる上、水路の製作に要する工程も少なくなるので、実機の大量生産モデルを考えた場合、製作期間やコストの面で有利である。又、水路がセル間のろう付け等の接合面を僅かしか通らないので、真空系との絡みも少なく、水漏れやリーク等の可能性も少なくなる^[2]。短所としては、ACSの場合、発熱面からの距離も遠く、水路を、結合空洞やバキュームパイプを避けて通さなければならないため、水路の本数や直径も制限を受け、セル当たりの伝熱面積に限度がある。

従って冷却効果はある程度(Model-Aで25~35℃の温度上昇)までしか上がらない。

次にModel-B, Model-Cの場合、長所としては、発熱壁面付近まで冷やすことになるので、最大限の冷却効果(Model-Cで約3℃の温度上昇)が得られ、水路の引き回し方によっては、温度分布も一様となり、局所的な熱応力の偏りが少なくなり、均等に温度膨張するので、冷却水温で周波数をコントロールする場合、最も適した方法と考えられる。短所として、ディスク部分まで冷却するので、ACSではスロットとスロットの間から水路を通さねばならず、強度の面や真空の面から、ある程度のディスクの厚みが必要となってくる。又、セル間のろう付け面に、かなりの水路が設けられるので、水圧や熱膨張による歪でリークが生じる可能性も高くなる。従ってModel-B,Cの実機化に当たって冷却系の問題点は、セル間のろう付け面、特にディスク間に設けられた多くの水路が、真空部分に近いので、ろう付けがうまくいって、真空が止まるかどうかにかかってくる。以上のように各モデルとも1長1短があるが、冷却効果の最も大きいModel-Cを進めることにした。今後の予定としては、8月初旬に入る予定のハイパワーモデルを測定して上述の解析結果と比較していくつもりである。

References

- [1] K. Yoshino et al. ; Proc. 14th Liner Accelerator Meeting in Japan (1989)
- [2] JHP-10, KEK Internal 88-8

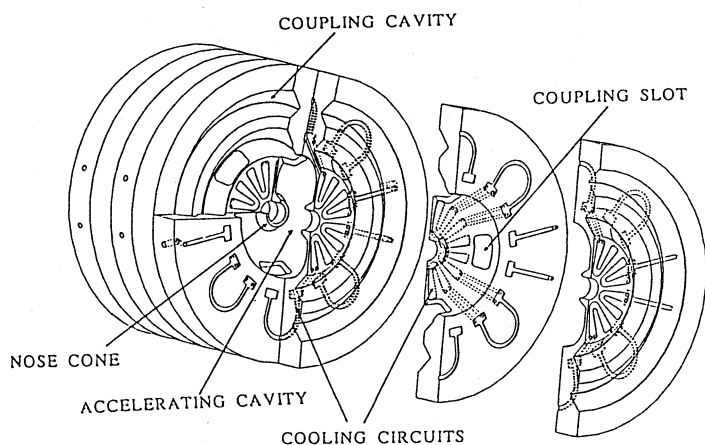


図1 開発中のACSハイパワーモデルの冷却水路

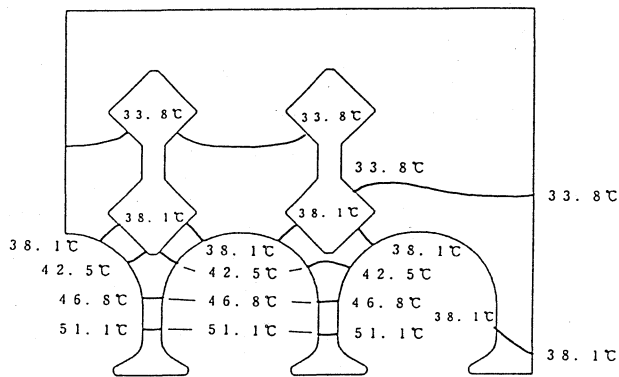
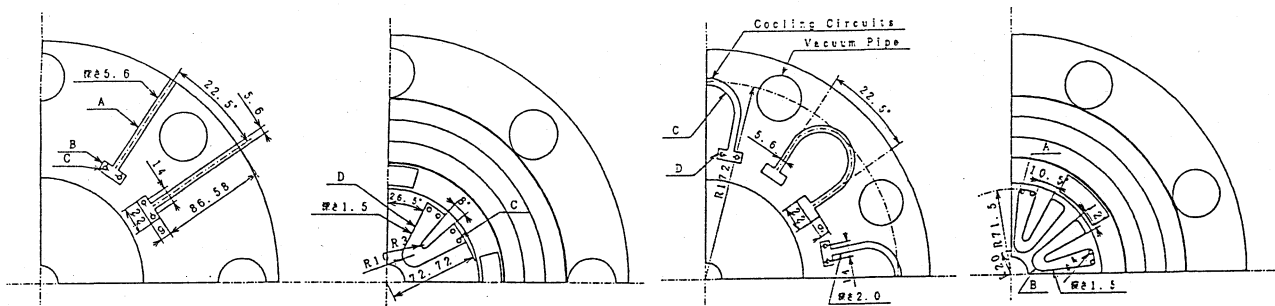


図3 Model-A の2次元解析による等温度線図



Model-B

Model-C

図2 ディスク部に冷却水路を設けた場合のモデル

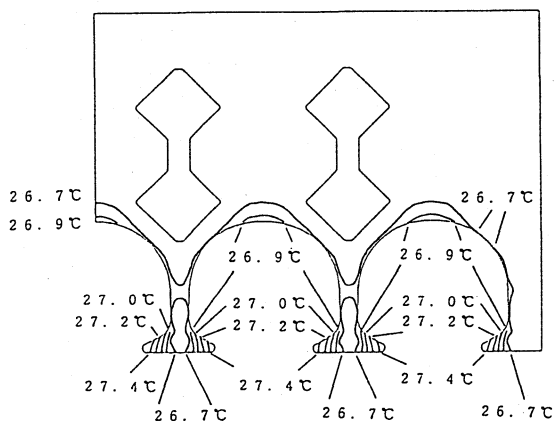


図4 Model-B の2次元解析による等温度線図

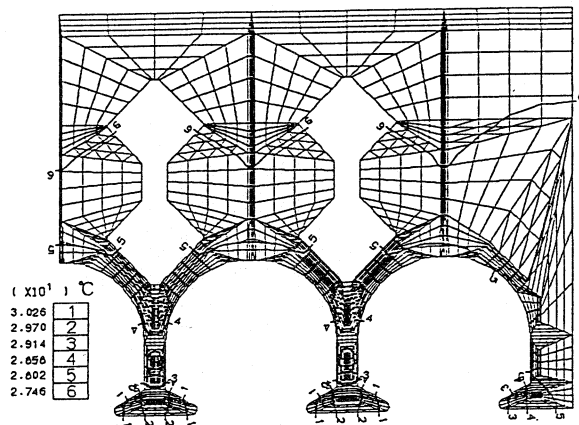


図5 Model-C の2次元解析による等温度線図

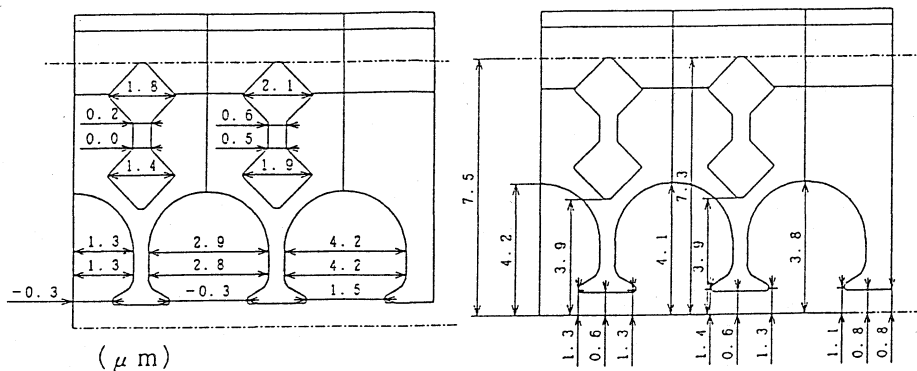


図6 Model-C の2次元解析による変形量