

PRESSURE DISTRIBUTION ANALYSIS OF THE KEK 2.5-GeV LINAC

Kazuhiisa KAKIHARA and Yoshio SAITO

KEK, National Laboratory for High Energy Physics

ABSTRACT

Since the vacuum system of a linac comprises many conduit pipes (such as accelerator columns, waveguides and pump ducts) it is a multiply connected network. In such a network having n nodes, by introducing an $n \times n$ Green-function matrix determined by the network geometry, the pressure (p_i) at the i th node can be expressed as $(p_i) = [G_{ij}](Q_j)$, where (Q_j) is the gas load. This type of analysis was applied to a KEK 2.5-GeV linac with 14 nodes, 19 branches and 2 pumps within the unit. The results show that the outgassing rate of the accelerator columns made of oxygen-free copper decreases from $\sim 10^{-10}$ to $\sim 10^{-11}$ Torr l cm⁻² s⁻¹ after high-power conditioning.

KEK2.5-GeVリニアックの圧力分布解析

1. はじめに

粒子加速器にあるような大型真空システムは、加速管、導波管、ビームダクト、それに真空排気ダクトといった断面形状、寸法、材質の異なったコンポーネントで構成されており、複雑なネットワークを形成している。このようなネットワークにおける圧力分布を把握することは、安定したオペレーションのためだけでなく、SORリングでの光脱離によるガス放出や加速管、高周波窓での電氣的破壊の現象を調査するためにも必要である。

SORリングのような円形加速器の圧力分布の解法については既に提示されているが¹⁾、この方法は単連結ネットワーク(枝を持たない直線、あるいは一つのループ)においてのみ適用可能なものである。複数のループを持つ多重連結ネットワークであるKEK 2.5 GeV リニアック真空システムの圧力分布を見積るために、今回我々は、先の解法を拡張した $n \times n$ のグリーン関数マトリックス $[G_{ij}]$ による圧力分布の表式 $(p_i) = [G_{ij}](Q_j)$ を求めた²⁾。更にこれを用いて高周波窓付近の圧力の低減についての検討も行なった。

2. 真空ネットワークの圧力分布

パイプ、節(パイプ接続点)、ループがそれぞれ b 、 n 、 l 個からなるネットワークを考えてみる。それぞれのパイプにおいては一様な断面を持つと仮定すると、その中の1本での圧力分布 $p(x)$ は、単位長さ当りのガス放出速度 ($q(x)$ [Torr l/s/m]) と断面を通り抜けるガス量 ($F(x)$ [Torr l/s]) により決定さ

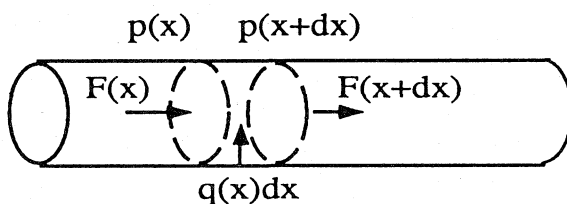


図1 1本のパイプ内の圧力とガスの流れ

れる。(図1)

$$dF(x) / dx = q(x) \tag{1}$$

$$C dp(x) / dx = -F(x) / L$$

C [l/s], L [m] はパイプのコンダクタンスと長さである。式(1)から $i-j$ パイプ(図2)の両端での F と p の関係が以下のように求まる。

$$\begin{aligned} F_{ij}(i) &= (1 - k_{ij}) Q_{ij} - C_{ij} (p_i - p_j) \\ F_{ij}(j) &= k_{ij} Q_{ij} + C_{ij} (p_i - p_j) \end{aligned} \tag{2}$$

ここで、 Q_{ij} (Torr l/s)、 k_{ij} は $i-j$ パイプの放出ガ

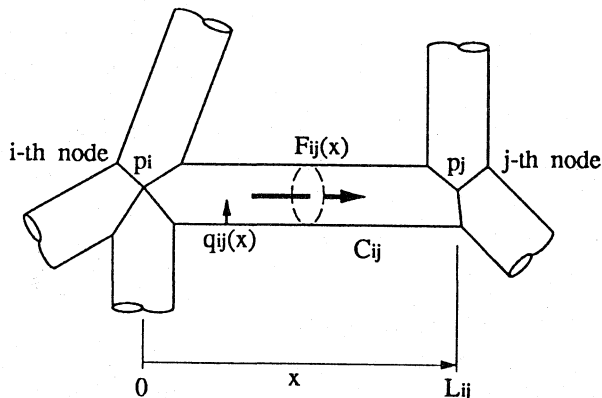


図2 $i-j$ パイプに於ける圧力とガスの流れ

ス総量とその重心であり、次式で定義される。

$$Q_{ij} = \int q_{ij}(x) dx \quad (3)$$

$$k_{ij} = \int x q_{ij}(x) dx / L_{ij} Q_{ij} \quad (4)$$

パイプ内で $q_{ij}(x)$ が一様であるとき、 k_{ij} は $1/2$ となり、パイプに添った圧力分布 $p_{ij}(x)$ は(1)式から二次曲線となる；

$$p_{ij}(x) = p_i + \{(p_j - p_i) + Q_{ij} / 2C_{ij}\} (x / L_{ij}) - (Q_{ij} / 2C_{ij}) (x / L_{ij})^2 \quad (5)$$

さて、全ての節でガスの流れは連続であるので、 n 個 (節の数) の連続の方程式

$$\sum F_{ij}(j) = 0 \quad (6)$$

(j : 節 i の周りのもの)

が成り立つ。従って (2)、(6) 式から p_i を求めるための n 個の方程式が得られるが、それは、コンダクタンスとポンプの排気速度を要素とする $n \times n$ 行列 $[C_{ij}]$ を用いて次のように表現できる。

$$[C_{ij}] (p_i) + (Q_j) = 0 \quad (7)$$

Q_j はパイプのガス放出を節に置き換えたものである。

$$Q_j = \sum (1 - k_{jh}) Q_{jh} \quad (8)$$

(h : 節 j の周りのもの)

さらに、逆行列 $[G_{ij}] (= -[C_{ij}]^{-1})$ を導入すると式(7)から

$$(p_i) = [G_{ij}] (Q_j) \quad (9)$$

が得られる。 $[G_{ij}]$ は、真空ポンプを含めたネットワークの幾何学的形状から決まるグリーン関数行列であると解釈できる。その対角成分 G_{ii} は、節 i での有効排気速度の逆数になると考えられる。また非対角成分 G_{ij} は、 $i-j$ パイプでガス放出があった時の節 i での圧力上昇を示す。こうしてネットワークの節の圧力分布を、放出ガス量 (Q_j) と $[G_{ij}]$ との行列の積で求めることができる。

3. KEK 2.5 GeV リニアックへの応用

2.5 GeV リニアックは全長400m、41の加速ユニットで構成されている。1台のSバンド (2856MHz) 大電力クライストロンから30MWのマイクロ波が供給されるそのユニットの概略図を図3に示す。構成部品は次のとおりである；

(1) ディスクとワッシャーで組み立てられた4本の2m加速管 (ディスクの穴径と外径は20mm、80mmで、各々35mm間隔で並んでいる)

(2) 7本の矩形導波管 (72×34mmの断面)

(3) 円形 (内径134mm) ダクト4本と楕円 (45×21mm) ダクト4本

(4) 50 l/s、500 l/sのイオンポンプ各1台 (前者はマイクロ波による障害を避けるために小径のダクトで導波管に接続されていることから、その有効排気速度はおおよそ10 l/sであると見積った)

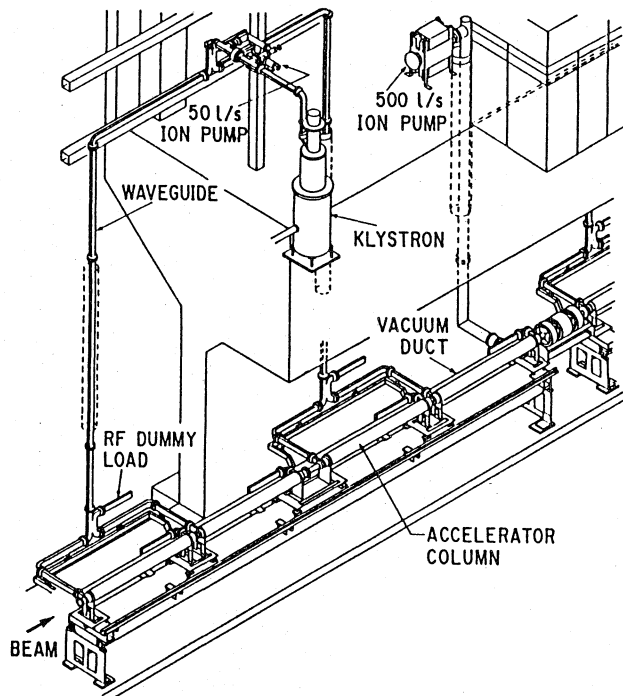


図3 2.5 GeVリニアック基本ユニット

加速管と導波管は無酸素銅 (OFC) 材で、真空ダクトはSUS304材で作られている。

前項で述べた圧力分布の関係式を実際のユニットに応用するため、図3を図4の模式図に置き換えて考えた。パイプの形状、寸法から見積った各コンダクタンスは $C_{12} \sim C_{1316}$ である。そしてこのときの $[C_{ij}]$ 、 $[G_{ij}]$ を表1-(1)に示す。これらのマトリックスは対称性を持つ。パイプのガス放出による節での圧力上昇の見積りを容易にするため G_{ij} の要素は $(l/s)^{-1}$ に換算して表してある。例えばパイプ7-8だけで一様なガス放出 ($Q_{78} = 1$ [Torr l/s]; $Q_7 = Q_8 = 0.5$ [Torr l/s]) があった場合、節7と節8での圧力上昇は

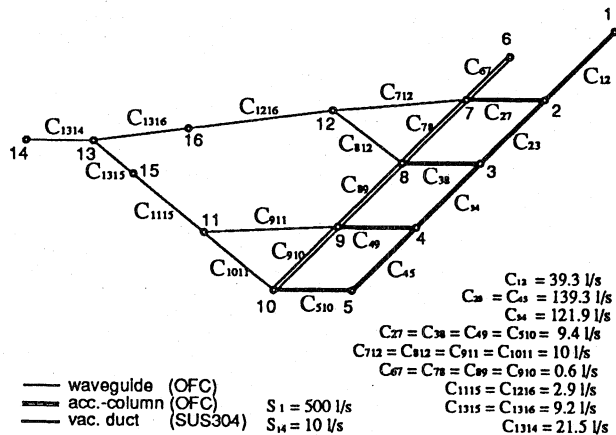


図4 基本ユニット模式図

表1-(1) [Cij] (下)と[Gij] (×10³) (上)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1.99	1.88	1.86	1.84	1.84	1.76	1.76	1.75	1.73	1.72	1.60	1.63	0.625	0.427	0.876	0.882
2		25.8	25.5	25.3	25.2	24.2	24.2	24.0	23.7	22.0	22.3	8.58	5.86	12.0	12.1	
3			32.2	31.9	31.8	25.5	25.5	28.8	29.8	29.8	27.6	25.2	10.2	6.98	14.7	14.1
4				39.7	39.5	25.5	25.5	29.0	36.7	36.8	33.9	25.4	11.5	7.84	17.2	15.1
5					46.3	25.5	25.5	29.0	38.0	41.6	36.6	25.5	12.0	8.21	18.3	15.5
6						1765	98.2	45.6	25.6	25.0	24.4	65.7	17.4	11.9	19.2	29.8
7							98.2	45.6	25.6	25.0	24.4	65.7	17.4	11.9	19.2	29.8
8								98.5	31.0	28.9	28.6	65.9	18.3	12.5	21.0	30.5
9									107	57.0	74.7	27.4	19.8	13.5	33.9	21.7
10										113	77.6	26.2	20.1	13.7	34.8	21.6
11											124	26.8	29.1	19.9	53.3	28.5
12												114	27.3	18.6	27.2	49.6
13													101	68.7	82.3	81.9
14														78.7	56.2	55.9
15															163	68.2
16																162

S1 = 500 l/s, S14 = 10 l/s

7.2×10⁻²Torrで、節1、節5、節14についてはそれぞれ1.76×10⁻³、2.73×10⁻²、1.23×10⁻²Torrとなる。このようにして求めたpi、pjと他のパラメータ (Cij、Qij、Lij) を式 (5) に代入することで、1本のパイプにおける圧力分布が得られる。これを全てのパイプについて行ない、ユニット全体の分布を求めることができる。

4. 計算例

図5-(1)は現在のシステムについて節1、2、7、8、12、16、13、14を結ぶ配管内圧力分布を表しており、各々の間隔は実際の距離に比例している。1と14に

S₁ (=500 l/s)、S₁₄ (=10 l/s) のポンプがある。またSUS304材、OFC材のガス放出速度をいずれも1×10⁻¹¹[Torr l/s/m²]として計算した³⁾。図から、コンダクタンスが小さい加速管やポンプから遠い導波管での圧力が高くなっていることが分かる。圧力低減対象箇所である高周波窓がある節14は約3×10⁻⁸[Torr]と見積られた。

次に節13、15、16 (いずれもクライストロンギャラリ導波管) に10 l/sのポンプを追加した場合を考えてみた。計算した[Cij]、[Gij]は表1-(2)に示した。圧力分布は図5-(2)のようになり、節14の圧力は約6.5×10⁻⁹[Torr]まで改善されることになる。

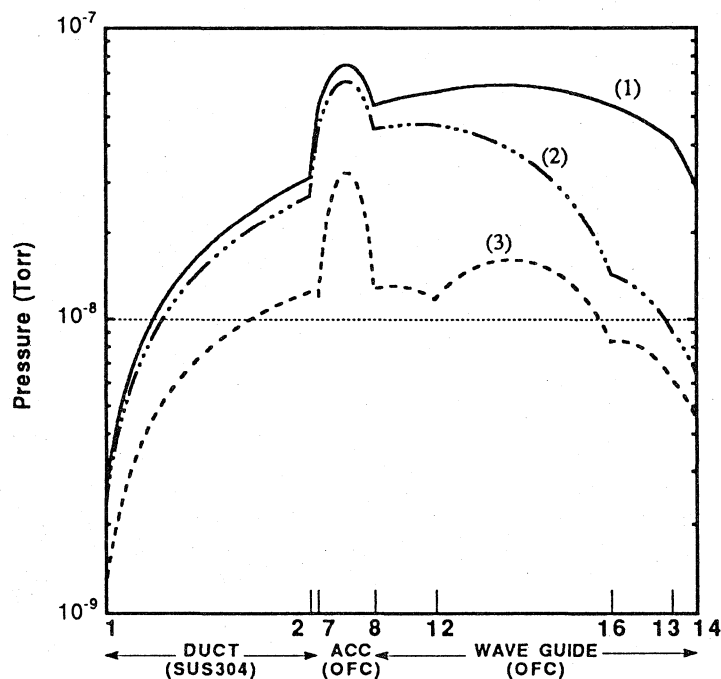


図5 異なる排気条件での圧力分布の違い

- (1) —————
S1 = 500 l/s, S14 = 10 l/s
- (2) - - - - -
(1)に、S13 = S15 = S16 = 10 l/s
を追加
- (3) ······
(2)に、S6 = S7 = S8 = S9 = S11
= S12 = 10 l/s を追加

表 1-(2) [Cij] (下) と [Gij] ($\times 10^{-3}$) (上)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1.99	1.81	1.78	1.75	1.74	1.63	1.63	1.61	1.58	1.57	1.38	1.41	0.118	0.081	0.234	0.239
2		24.9	24.4	24.1	23.9	22.3	22.3	22.0	21.6	21.5	18.8	19.4	1.62	1.11	3.21	3.28
3			30.9	30.4	30.2	23.3	23.3	26.5	27.3	27.2	23.8	21.8	1.93	1.32	4.00	3.73
4				38.0	37.7	23.0	23.0	26.4	33.8	33.9	29.6	21.6	2.17	1.48	4.88	3.80
5					44.5	22.9	22.9	26.3	34.9	38.5	32.1	21.5	2.27	1.55	5.26	3.83
6						1761	94.1	41.3	21.6	21.0	18.7	59.1	3.30	2.25	3.85	9.35
7							94.1	41.3	21.6	21.0	18.7	59.1	3.30	2.25	3.85	9.35
8								94.0	26.8	24.6	22.6	59.1	3.46	2.36	4.44	9.41
9									101	51.6	66.8	21.3	3.73	2.55	10.6	4.37
10										107	69.4	20.1	3.79	2.59	10.9	4.22
11											111	18.3	5.49	3.75	17.3	4.66
12												104	5.16	3.52	4.53	16.1
13													37.5	25.6	15.5	15.5
14														49.2	10.6	10.6
15															55.4	6.74
16																55.3

S1 = 500 l/s, S13 = S14 = S15 = S16 = 10 l/s

表 1-(3) [Cij] (下) と [Gij] ($\times 10^{-3}$) (上)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1.95	1.34	1.23	1.15	1.12	0.030	0.533	0.506	0.503	0.756	0.362	0.299	0.028	0.019	0.060	0.052
2		18.4	16.8	15.8	15.4	0.414	7.32	6.94	6.90	10.4	4.97	4.10	0.384	0.262	0.823	0.710
3			21.9	20.5	20.1	0.394	6.95	8.73	8.98	13.5	6.46	4.52	0.465	0.317	1.06	0.798
4				26.9	26.3	0.369	6.52	8.26	11.7	17.7	8.43	4.26	0.538	0.367	1.36	0.791
5					32.7	0.361	6.38	8.09	11.9	21.5	9.59	4.17	0.583	0.398	1.54	0.798
6						94.4	2.32	0.406	0.168	0.245	0.120	0.784	0.038	0.026	0.031	0.122
7							41.1	7.18	2.96	4.32	2.11	13.9	0.676	0.462	0.555	2.153
8								41.6	4.50	5.62	2.93	14.0	0.718	0.490	0.682	2.19
9									43.6	15.2	16.9	2.17	0.807	0.551	2.62	0.614
10										78.0	26.8	2.90	1.26	0.858	4.14	0.890
11											46.7	1.53	2.04	1.39	7.17	1.01
12												42.2	1.85	1.26	0.938	6.47
13													37.2	25.4	14.9	14.9
14														49.1	10.2	10.2
15															5.38	6.02
16																53.7

S1 = 500 l/s, S6 = S7 = S8 = S9 = S11 = S12 = S13 = S14 = S15 = S16 = 10 l/s

トンネル内のハイブリッド (節11、12) と加速管付近 (節6、7、8、9) に6台の10 l/sポンプを更に追加したと仮定すると、その結果は図5-(3)のようになった。[Cij]、[Gij]を表1-(3)に示す。予想通りシステム全体の圧力低下が見られるが、節14の圧力は(2)に比べてそれ程大きく低減はされず約 5×10^{-9} [Torr]に留まる。したがって更に低い圧力を得るためには、ガス放出速度を 1×10^{-11} [Torr l/s/m²]よりも低くする必要があることが分かる。

5. まとめ

複雑なネットワークを持つ2.5 GeVリニアック真空システムの圧力分布を、 $(p_i) = [Gij] (Q_j)$ の関係式により求めることができた。

リニアックのようにコンダクタンスが小さく、複雑なネットワークを形成している真空システムで全体の圧力を低くするためには、ポンプの全排気速度を一定とした条件では、個々の排気速度は小さくと

も、取付位置を分散する方が効果的であることが今回の計算から分かった。また特定箇所の圧力を低くする必要がある場合には、ポンプをその周辺の適切な位置に設けることが望ましいと結論できる。

尚、今回の計算ではガス放出速度を 1×10^{-11} [Torr l/s/m²]としたが、実際の排気過程を見積るにはポンプの有効排気速度、コンポーネントのガス放出速度の現実の値を知る必要がある。ポンプ増設による高周波窓付近の圧力低減効果を実機で調べる際には、この点を考慮しなければならない。

参考文献

- 1) M Kobayashi, AIP Conf. Proc. (Edited by H Halama, J C Schuchman and P M Stefan) 171, 155 (1988).
- 2) G Horikoshi, Y Saito and K Kakihara, Vacuum, 40, (1990) 2132.
- 3) Y Saito, K Kakihara and G Hotikoshi, Vacuum, 44, (1993) 535.