

## PLS 2 GeV 선형가속기의 진공계통 설계

김입경 · 오형석<sup>†</sup> · 이인준<sup>†</sup> · 박주식 · 남궁원

포항공과대학 포항가속기연구소

<sup>†</sup>포항제철전기콘트롤주식회사, 기술연구소

(1993년 1월 28일 접수)

### Vacuum System Design of the PLS 2 GeV Linac

Y. K. Kim, H. S. Oh<sup>†</sup>, I. J. Lee<sup>†</sup>, J. S. Bak, W. Namkung

*Pohang Accelerator Laboratory, Postech*

<sup>†</sup>*Research & Development Center, Poscon*

(Received January 28, 1993)

**요 약**—본 논문은 포항가속기연구소에서 건설중인 PLS 2 GeV 선형가속기 진공계통의 설계에 관한 것이다. PLS 2 GeV 선형가속기의 진공계통은 길이 3.07 m인 42개의 가속관과 길이 약 400 m의 도파관으로 구성되어 있다. 진공장치의 배치는 충분한 지역적 배기능력을 고려한 분산 배기방식으로 다지관 방식의 기계적 복잡성을 단순화하였다. 진공계는 가속관 중심과 도파관에서  $5 \times 10^{-7}$  Torr, 클라이스트론 출력창에서  $5 \times 10^{-8}$  Torr까지 배기되도록 설계하였다. 주 진공펌프로는 가속관과 도파관 및 에너지 배가장치에 대하여 각각 용량이 60 l/s와 120 l/s인 sputter 이온펌프를 사용하기로 하였다.

**Abstract**—This paper describes the vacuum system design for the PLS 2 GeV linac which is now under construction at Pohang Accelerator Laboratory (PAL). The vacuum system of the PLS 2 GeV linac consists of forty two 3.07 m long accelerating columns and about 400 m long waveguide network. The configuration is adopted by the distributed pumping method to simplify the mechanical complexity from the manifold method. The vacuum system is designed to evacuate the accelerator to the pressure of  $5 \times 10^{-7}$  Torr at the center of the each column and of  $5 \times 10^{-8}$  Torr at the klystron output window. The main pumps are: one 60 l/s sputter ion pump for each accelerating column, two 120 l/s sputter ion pumps for the waveguide system and the energy doubler for each module.

### 1. 서 론

본 논문은 포항 방사광 시설(PLS; Pohang Light Source)의 주 가속장치인 선형가속기의 진공계통에 관한 것이다. PLS 2 GeV 선형가속기의 진공계통은 크게 빔(beam) 가속과 초고주파 전력전송을 위한 가속관 및 도파관계, 광학적 정밀측량을 위한 광측관 및 빔 switchyard로 구분할 수 있다. 빔 통로의 진

공계통은 용도에 따라 요구 진공도의 차이가 다소 있으나, 보통  $10^{-7} \sim 10^{-9}$  Torr 범위의 고진공 및 초 고진공 상태가 요구되며, 정밀측량용 광측관의 요구 진공도는  $10^{-2}$  Torr 정도이다. 배기순서는 저진공 배기와 고진공 배기로 나누어지며  $10^{-5}$  Torr까지의 저진공 배기는 터보 분자펌프를 사용하고  $10^{-5}$  Torr부터는 triode형 sputter 이온펌프로 전환하여 고진공 배기를 진행하도록 구성되어 있다. 진공장치의 배치는

기계적 복잡성을 배제하기 위하여 기존의 다지관(manifold) 배기방식 대신에 분산 배기방식을 채택하였으며, 가속관과 도파관을 위한 주 이온펌프의 용량은 배기관의 conductance와 방출 가스량을 고려하여 60 l/s, 120 l/s의 두 종류를 사용하기로 결정하였다.

본 논문에서는 PLS 2 GeV 선형가속기의 진공 요구조건, 진공도 계산 그리고 진공계통의 구성 및 구성부품 등의 순서로 논하기로 한다.

## 2. 진공 요구조건

일반적으로 전자 선형가속기를 위한 진공목적은 다음의 두 가지로 압축해 볼 수 있다. 첫째는 전자 가속에 이용되는 수백 MW급의 대전력 초고주파 전장내에서 전기적 절연과파괴를 방지하기 위한 것이며, 둘째는 일정 간격으로 원판이 삽입되어 있는 가속관 내부를 빔이 통과하면서 가속관 내의 잔류 가스와 지나친 산란을 일으키지 않도록 하는데 있다. 실제로, 초고주파 절연과파괴 현상은  $10^{-7}$  Torr 이하에서, 전자 산란 현상은  $10^{-5}$  Torr 이하에서 각각 방지할 수 있는 것으로 알려져 있다[1-3]. 사실 진공도가  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  Torr 이하일 때는 이미 Paschen 법칙이 적용되지 않으며[4], 절연과파괴 현상은 더 이상 전극 사이의 가스 종류나 진공도에 의해 결정되지는 않는다. 오히려 사용된 전극의 재질이나 표면상태에 크게 의존한다. 진공도는 가속 전극간의 공간압력에 비례하는 것이지만 진공방전의 입장에서 고려해 보면 전극의 형상, 주어지는 전계강도 및 전극표면의 성질이 더 중요하다. 또 방출가스의 양에 따라 압력이 변하므로 결국 전극표면의 청정 정도가 진공도로 표시되고 있다고 생각하는 것이 타당하다. 고진공 상태에서의 절연과파괴는 단순히 전자의 장방출(field emission)만으로 생각할 수 없는데, 이는 대부분의 금속 경계면은 흡착된 가스층을 갖거나 방전을 쉽게 야기시킬 수 있는 산화표면으로 되어 있기 때문이다. 본 진공계통에서는 이러한 여건을 완전히 배제할 수 없으며, 적절한 세척(cleaning)과 열건조(baking)를 통해 가스 방출을 현저하게 감소시켜야 한다.

선형가속기의 진공에 대한 요구는 가속관에서보다 진공도에 따라 음극의 수명이 크게 좌우되는 전자총에서 조건이 더 까다롭다. 본 PLS 2 GeV 선형가속기의 요구 진공도는 가속관 중심부와 도파관에서  $5 \times$

$10^{-7}$  Torr, 클라이스트론 출력창에서  $5 \times 10^{-8}$  Torr이며 전자총에서  $1 \times 10^{-8}$  Torr이하이다. 위의 진공도를 만족하기 위해서는 구조적 제한으로 인하여 conductance가 낮은 가속관의 입력 결합기 전단에서 10 l/s, 클라이스트론 출력창에서 20 l/s의 유효 배기속도를 유지하여야 한다.

진공계통 설계 요구조건에 부가되는 또 다른 제한 조건으로는 대전력 초고주파의 전력손실을 최소화할 것, 기름이나 다른 유기물질로부터 오염되지 않을 것, 유지보수를 최소화하기 위해 가능하다면 금속 seal을 사용할 것, 주 구성품의 수명은 10년 이상을 유지할 것 등으로 열거해 볼 수 있다.

## 3. 진공도 계산

선형가속기 뿐만 아니라, 모든 형태의 하전입자 가속기에서 필요로 하는 진공도를 결정하는 주요인은 2절에서 언급했듯이 크게 두 가지로 대별되며, 요구 진공도를 계산하기 위한 기본 관계식은 보통 다음의 관계식 (1)로 표현할 수 있다[5].

$$P = P_o + (Q_i + Q_g + Q_l) / S_{eff} \quad (1)$$

여기서  $Q_i$ 는 외부에서 주입되는 가스량,  $Q_g$ 는 진공함 내, 표에서의 가스 방출량이며,  $Q_l$ 은 진공용기의 누설(leak)을 통해 침투되는 누설량이다. 진공펌프의 유효 배기속도를  $S_{eff}$ 라 하면 최종압력 P는 식 (1)처럼 주어지게 된다.  $P_o$ 는 배기하고자 하는 기체가 존재하지 않을 때 진공펌프가 나타내는 압력으로 도달 진공도라 한다. 일반적으로 이온펌프의 도달 진공도는 앞절에서 언급한 요구 진공도보다 1/100~1/1000 정도로 훨씬 낮기 때문에 무시하기로 한다. 또한 가속 전자원으로 전자총을 사용하기 때문에 외부에서 주입되는 가스량은 없다. 그리고 누설이 전혀 없는 이상적인 진공계로 가정한다면 식 (1)은

$$P = Q_g / S_{eff} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다.

유효 배기속도  $S_{eff}$ 는 펌프의 배기속도와 진공함의 conductance에 의해 결정된다. 가속관과 도파관은 구조적으로 conductance에 제한을 가하고 있으므로, 결국 선형가속기 진공계의 유효 배기속도는 가속관과 도파관의 conductance에 의해 지배된다. 가속관과

**Table 1.** 선형가속기의 도달 진공도(계산값)

| 위 치                   | 진공도(Torr)            |
|-----------------------|----------------------|
| $P_{IK}$ (R형 가속관 입력단) | $4.4 \times 10^{-8}$ |
| $P_{IL}$ (L형 가속관 입력단) | $1.6 \times 10^{-7}$ |
| $P_{CR}$ (R형 가속관 중심)  | $9.1 \times 10^{-8}$ |
| $P_{CL}$ (L형 가속관 중심)  | $2.1 \times 10^{-7}$ |
| $P_{KW}$ (클라이스트론 출력창) | $3.1 \times 10^{-9}$ |
| $P_{ED}$ (에너지 배가장치)   | $7.1 \times 10^{-9}$ |

도파관의 conductance 계산에는 각각 다음의 식 (3), (4)를 이용하였다[5].

$$C = 12.1 \frac{D^3}{L_1} \alpha \quad (3)$$

$$C = 30.9 \frac{a^2 b^2}{(a+b) L_2} K \quad (4)$$

여기서 D는 가속관의 직경,  $L_1$ 는 가속관의 길이,  $\alpha$ 는  $L/D$ 비 값에 따른 Clausing 인자이며 a, b는 도파관의 내부크기,  $L_2$ 는 도파관의 길이, K는  $b/a$ 비 값에 대한 수정인자이다. 무산소 동(OFHC copper)으로 제작될 가속관 및 도파관과 스테인레스 304 L로 제작될 각 구성부품의 가스 방출률은  $3 \times 10^{-11}$  Torr-l/s-cm<sup>2</sup>와  $1 \times 10^{-11}$  Torr-l/s-cm<sup>2</sup>으로 추정하여 진공도 계산에 이용하였다. 계산은 가속관의 입력 결합기 부분, 가속관의 중심부, 클라이스트론 출력창 및 에너지 배가장치 부근에서 각각 수행하였다. 단위 가속관의 내부 표면적은  $1.55 \times 10^4$  cm<sup>2</sup>이며 식 (3)으로부터 계산된 가속관 conductance는 0.5 l/s이다. 배기속도가 60 l/s인 이온펌프를 채택할 경우 L형 및 R형 도파관의 유효배기속도는 각각 7.5 l/s와 15.3 l/s이다. 72.14 mm×34.04 mm의 사각 구경을 갖는 단형 도파관의 conductance는 클라이스트론 출력창과 에너지 배가장치에서 각각  $C_{KW}=95$  l/s,  $C_{ED}=142$  l/s이다. 배기속도가 120 l/s인 이온펌프를 부착할 경우 53 l/s와 65 l/s의 유효 배기속도를 얻을 수 있다. 위의 계산자료를 이용하여 도달 진공도를 계산한 결과 각 부위에서의 진공도는 Table 1과 같다.

#### 4. 진공계통의 구성 및 구성부품

##### 4.1. 진공계통의 구성

진공계통은 클라이스트론을 기본단위로 하여 11개의 module(K1, K2, ... K11)로 구성되어 있으며, 이 11개의 module을 크게 4부분(sector)으로 나누었다. sector I은 K1을, sector II는 K2에서부터 K4까지를, sector III는 K5에서 K7까지이며, sector IV는 K8부터 K11까지이다[6]. 이중 가장 긴 sector는 sector IV로서 전체 길이가 약 55.4 m이며 16개의 가속관과 4개의 클라이스트론을 포함하고 있다. 3072.76 mm인 두 개의 가속관을 가지는 전단 입사장치(preinjector)를 제외한 나머지 10 module은 4개의 가속관과 이와 연결되는 길이 약 35 m의 도파관으로 구성되어 있다. Module간은 수동 게이트밸브로, sector간은 pneumatic 게이트밸브로 각각 분리 차단될 수 있도록 하였다.

가속관의 내경은 약 83.5 mm이며, 그 내부는 원판 중심부에 직경 19.09~26.22 mm의 구경을 가지고 균등한 간격으로 배열되어 있는 86개의 공동(cavity)으로 형성되어 있다. 이런 형상을 한 가속관의 conductance는 구조적 제한을 받고 있기 때문에, 이를 개선하기 위하여 각각의 가속 공동마다 진공 연결부를 채용하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 이것은 현실적으로 불가능하며, 보통은 소수의 대용량 펌프를 사용하는 다지관 배기방식과 다수의 소용량 펌프를 채용하는 분산 배기방식중 택일하여 사용한다. 계산 상으로는 molecular flow에 대한 가속관의 conductance는 매우 낮아서 가속관 입력단에서 무한대의 배기속도는 유효 배기속도 측면에서 볼 때 입력단에서 1 l/s의 배기속도를 갖는 경우보다 단지 두 배 정도 향상된 것에 불과하다. 그러므로 반드시 대용량의 배기속도를 갖는 펌프를 채택할 필요는 없다.

PLS 2 GeV 선형가속기에서는 분산 배기방식을 채택하였으며 이 방식은 다수의 소용량 펌프로 배기하므로 가속관의 길이 방향으로 비교적 균일한 진공도를 얻을 수 있다. Fig. 1은 전형적인 한 module의 장치 구성도이며, Fig. 2는 1990년 12월 7일, 61.2 MeV의 전자빔을 인출하는데 성공한 preinjector에 대한 빔 성능 검증기간 동안의 진공 이력을 보여주고 있다. 각 module은 두 대의 이동식 터보 분자펌프, 6대의 triode형 sputter 이온펌프[7-10], 진공계이지 및 연결 부품으로 구성되어 있다. 선형가속기는 Fig. 1처럼 지하인 터널부와 지상인 클라이스트론 갤러리부로 양분되며 터널에는 60 l/s의 배기속도를 갖는 4대의 sputter 이온펌프가 가속관과 도파관의 배기를, 클라

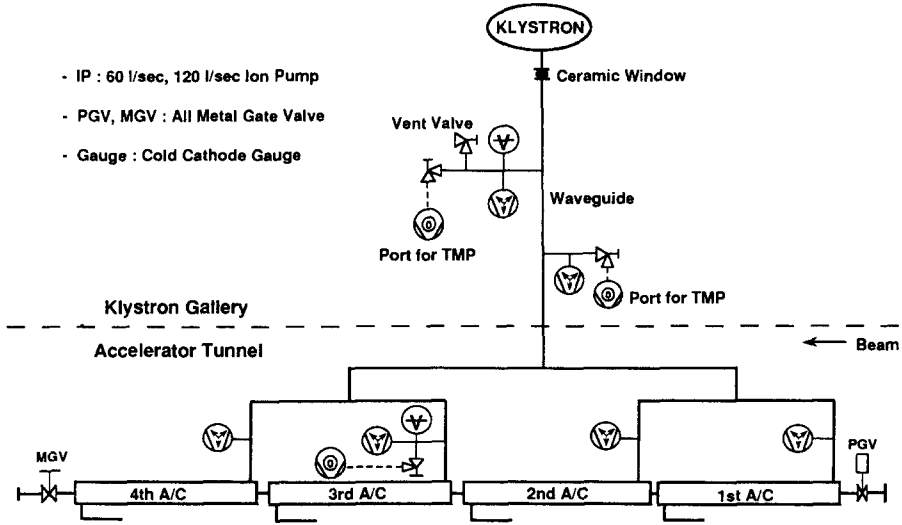


Fig. 1. The typical vacuum system layout.

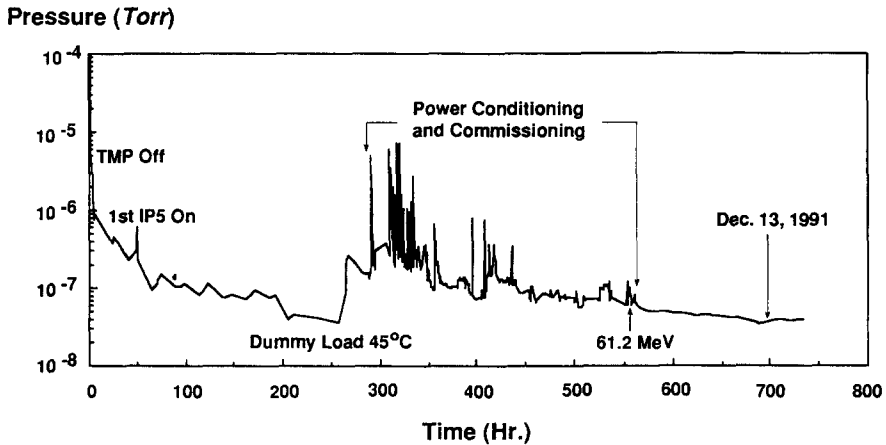


Fig. 2. Vacuum pressure history of the preinjector linac.

이스트론 갤러리에는 배기속도 120l/s인 두 대의 sputter 이온펌프가 클라이스트론 출력창 근처의 도파관과 에너지 배가장치 근처의 배기를 처리하도록 설계하였다. Roughing 진공작업은 오일 역류 방지형 터보 분자펌프를 채택하여 기름 오염의 원인을 제거하였으며, 10<sup>-5</sup> Torr 수준까지 가능한 한 빠른 시간 내에 도달할 수 있도록 터널과 갤러리에서 동시에 배기할 수 있게 하였다.

4.2. 진공계통 구성부품

초고진공 영역에서의 높은 배기속도, 배기계의 오염방지, 무소음 및 무진동, 긴수명, 낮은 전력소모 등의 특징을 갖추고 있는 triode형 titanium sputter 이온펌프를 주 진공펌프로 채택하였다. 이온펌프 선택시 배기속도, baking온도, 동작 가능한 초기 압력, 인가 전압의 범위, 음극 재질, 수명, 배기구의 flange 크기, 누설자장의 세기 등을 고려하였다. 특히 가속관 근처에 위치하는 이온펌프의 경우, 누설자장이 가속빔에 영향을 미치지 않도록 30cm이상의 충분한 거리로 분리시켜 누설자장의 영향이 미치지 않도록 배

치하였다. 동작이 가능한 초기 진공도는  $10^{-5}$  Torr로 하였으며 인가 전압은 5~7 kV범위로 하였다. 전력 소모량은 같은 배기 능력을 갖는 유확산펌프의 1% 미만으로 매우 경제적이다.

배기계는 배기 통로가 매우 길고 conductance가 낮기 때문에 가능한 한 누설을 최소화 하고 청정 정도를 높여야 한다. 이러한 특성을 고려하여, 각종 piping과 flange 그리고 밸브에는 304 L을, 가속관을 포함한 도파관 및 gasket에는 무산소 동을 사용하기로 하였다. 각종 진공부품은 우선 CERN에서 실시하고 있는 세척방법을 근거로 하여 초음파 세척과 화학적 세척을 실시할 것이다. 세척이 끝난 부품은 진공상태에서 400°C로 열건조할 수 있도록 계획하고 있으며, 무산소 동의 도파관과 가속관은 설치 전에 최대 출력 상태에서 RF조정(tuning)을 받아야 한다. 진공 게이지는 module별로 냉 음극형 게이지(cold cathode ionization gauge)와 열 음극형 게이지(BA type hot filament ionization gauge)를 설치하여 이중으로 확인하는 방식을 택하였으며, 또한 게이지 간의 특성 비교가 가능하도록 하였다. 보통은 냉 음극형 게이지가 열 음극형 게이지보다 수명이 더 길고 취급이 용이하기 때문에 많이 사용되고 있으며, 감도도 열 음극형 게이지와 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 알려져 있다. Gauge는 module별로 터널과 갤러리에 각각 한 개씩 위치시킬 계획이다. 이온펌프를 사용할 경우 이온펌프 자체가 진공 게이지 역할을 대행할 수 있기 때문에 반드시 초고진공용 진공 게이지가 요구되는 것은 아니다. 많은 이온펌프가 분산 배치되어 있기 때문에 진공계 전체의 상태를 오히려 쉽게 파악할 수 있는 이점이 있다. 따라서 진공도의 정확한 측정보다는 오히려 진공의 신뢰도와 안정성에 더 중점을 두고 진공 게이지를 이용하는 것이 선형가속기의 특성이라 생각할 수 있다.

한편 진공 게이지의 제어장치는 진공계의 보호와 다른 중요계통의 연동작용장치 역할을 하게 된다. 국부적으로 누설이 생겼거나 방출 가스량이 심하여 갑작스런 진공도 변화로 진공상태가 악화될 경우 반응하는 주요 연동작용으로는 빔 가속의 정지, modulator triggering 정지 및 sector 밸브의 닫힘 등을 들 수 있다. 각 관련 계통에 대한 연동작용용 진공도의 한계값은 Table 2처럼 요약해 볼 수 있다. 그 밖에 진공 누설검사는  $1.5 \times 10^{-10}$  Torr-l/s까지 검출이 가

Table 2. 연동작용용 진공도 설정치

| 연동계통       | 진공도(Torr)          |
|------------|--------------------|
| 가속관        | $1 \times 10^{-6}$ |
| 클라이스트론 출력창 | $1 \times 10^{-7}$ |
| 전자총        | $1 \times 10^{-7}$ |

능한 헬륨누설검출기(helium leak detector)와 200 AMU까지 분석이 가능한 잔류가스분석기(RGA)를 사용할 것이다[11, 12].

### 5. 광축관 및 빔 Switchyard의 진공

두께 15 mm, 외경 350 mm의 알루미늄관으로 제작될 가속관 지지대인 girder는 laser 정밀 측량계를 위하여 광축관으로 이용된다. 광축관 내부에서 표적으로 이용되는 fresnel 렌즈가 위치하고 있으며 이것의 정렬 허용정도는  $\pm 0.25$  mm이내이기 때문에 laser 빔의 분산을 최소화 하기 위해 광축관 내부를 진공상태로 유지해 줄 필요가 있다. 26개의 girder로 구성될 전체 광축관의 길이는 약 140 m이며, 배기될 광축관의 부피는 약  $12 \text{ m}^3$ 이다. Laser 빔의 변위를 25  $\mu\text{m}$  이하가 되도록 하기 위해서는 터널의 평균온도 기울기는 3°C/m 이하이어야 하며, 광축관의 진공도도  $10^{-2}$  Torr 정도를 유지해야 한다. 광축관의 진공을 위하여 300  $\text{m}^3/\text{hr}$ 의 root 펌프와 로타리 베이네프를 직렬로 연결하여 광축관 종단에 부착하여 배기시킬 경우 배기시간은 16시간 이내가 될 것이다. 또한 광축관의 길이 방향에 대한 진공도 분포를 파악하기 위하여 광축관 양단에 pirani gauge를 설치할 수 있게 하였다.

빔 switchyard의 진공은 가속관 만큼 요구조건이 까다롭지는 않다. 전자가 수송도중 공간에 잔류한 기체와 충돌하여 그 진로가 변경되어 안정 궤도에서 벗어나거나, 전하상태가 변하여 빔 수송조건이 만족되지 않는 경우만 고려하면 된다. 설계 진공도를  $10^{-7}$  Torr로 정하였으며 주 진공펌프로 가속관과 마찬가지로 triode형 sputter 이온펌프를 이용할 것이다.

### 6. 결 론

기존의 다지관 배기방식에서 탈피하여 분산 배기

방식을 취함으로써 장치의 구조적 복잡성을 제거하였으며, 이로 인해 길이 방향으로 비교적 균일한 진공도를 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 그러나 다지관 배기방식에 비해 conductance가 저하되기 때문에 roughing에 소요되는 시간이 다소 길 것으로 예상된다. 장치의 구성은 운영 및 유지 보수가 용이하도록 설계하였으며, 구성부품은 기름이나 유기물질로 부터 오염이 최소화 되도록 선정하였다. 60 MeV 전단 가속장치의 설치 및 검사 경험을 토대로 하여 철저하고 치밀한 조립작업과 검사업무를 수행한다면, 큰 장애 없이 초고진공 영역의 진공도에 도달할 수 있을 것으로 확신한다.

### 참고문헌

1. R. B. Neal, *The Stanford Two-mile Accelerator* (Benjamin. Inc., 1968), Chap. 23.
2. W. D. Kilpatrick, *Rev. Sci. Instrum.* **28**(10), 824 (1957).
3. E. Tanabe, *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **NS30**(4), 3551 (1983).
4. F. Paschen, *Wied. Ann.* **37**, 69 (1889).
5. A. Roth, *Vacuum Technology* (North-Holland, New York, 1976), Chap. 3.
6. PLS Project, *Design Report* Revised ed. (PAL, Pohang, 1992), Chap. 3
7. R. L. Jepsen, *Proc. of the Fourth International Vacuum Congress*, 317 (1968).
8. J. H. Singleton, *J. Vac. Sci. Technol.*, **8**(1), 275 (1971).
9. H. Hartwig and J. S. Kouptsidis, *J. Vac. Sci. Technol.* **11**(6), 1154 (1974).
10. M. Audi and M. de Simon, *Vacuum* **37**, 629 (1987).
11. W. E. Austin, Fu Ming Mao, Jin Man Yang and J. H. Leck, *J. Vac. Sci. Technol.* **A5**(4), 2631 (1987).
12. G. Reich, *Vacuum* **37**, 691 (1987).