

$R=0.8m$, $A=1.25$ 구형또까마크플라즈마가열을 위한 NBI체계의 물리설계

김용제, 채광일, 김문옥

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《…우리 나라의 실정에 맞는 수력발전소, 화력발전소, 원자력발전소를 건설하는데서 나서는 과학기술적문제를 풀도록 하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 135페이지)

지금까지 $R=0.8m$, $A=1.25$ 구형또까마크의 옴가열권선과 플라즈마가두기평형배위를 위한 폴로이달 및 토로이달권선들에 대한 물리설계[1, 2]가 진행되었지만 플라즈마가열을 위한 합리적인 보조가열체계에 대한 연구결과는 발표되지 않았다.

우리는 $R=0.8m$, $A=1.25$ 구형또까마크플라즈마가열에 리용할수 있는 NBI체계의 물리설계를 위한 주요특성파라미터들을 평가하였다.

1. 빠른 중성립자속의 입사에너지결정

일반적으로 원자들을 토로이달방향으로 입사시킬 때 중성립자속의 침투와 포획은 플라즈마밀도와 속에너지에 관계된다.[4]

중성립자속이 로심플라즈마에 입사하면 전하교환에 의하여 에너지가 E_b 인 빠른 이온들이 생성된다. 이때 이 이온들이 플라즈마의 열에너지까지 감속하는 시간 t 는 E_b 와 림계에너지 E_C , 전자에 의한 스피터감속특성시간 τ_s 를 리용하여 결정할수 있다.[3]

$$t = (\tau_s \cdot \ln(1 + (E_b / E_C)^{3/2})) / 3 \quad (1)$$

여기서 $\tau_s \approx 0.1 \frac{M_b}{n_e} \cdot \frac{T_e^{3/2}}{n_e Z_b^2}$, M_b 는 빠른 이온의 질량, Z_b 는 빠른 이온의 전하수이다.

이온과 전자들에 의한 에너지전송속도가 각이할 때 중수소플라즈마에 중수소속을 입사시키는 경우 에너지전송속도는 $E_C = 18.6T_e$ 에 의하여 결정된다.

빠른 이온들의 에너지는 $E_b = 2.41E_C$ 일 때 같은 정도로 플라즈마이온과 전자들에 전달[3]되는데 우리의 경우 $R_0=0.8m$, $A=1.25$ 구형또까마크의 옴가열후 플라즈마의 온도가 0.62keV정도이므로 $2.41E_{C(D-D)} \approx 28keV$ 이다.

그리고 이온원천으로 중수소플라즈마를 리용할 때 원천으로부터 방출되는 속이 성분 $D_1(75\%)$, $D_2(20\%)$, $D_3(5\%)$ 으로 이루어지고 여기서 D_2 , D_3 분자들은 해리되어 원자들로 갈라지면서 종전에너지의 1/2, 1/3을 가지고 로심플라즈마에 입사한다는것을 고려하면 로심플라즈마가열에 필요한 속의 에너지는 $E_b \approx 34keV$ 정도이다.

λ_a 는 밀도가 n_e 인 플라즈마에 들어가는 원자의 에너지대역이 $E_b = 20 \sim 100keV$ 일 때

다음의 공식에 의하여 평가할수 있다.

$$\lambda_a = (\alpha \times E_b) / n_e \quad (2)$$

여기서 λ_a 는 cm, E_b 는 keV, n_e 는 $10^{19}/\text{m}^3$ 단위로 계산된다. α 는 중수소원자속의 경우 2.7이다.[3]

$R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형또까마크의 평형해석으로부터 장치에서 $P_B=0.058\text{MPa}$, $\beta=0.8$ [1]이며 플라즈마압력은 0.046MPa 이다.

움가열후 플라즈마가 열평형상태에 있다고 보면 $P = (n_e + n_i)kT_e \approx 2n_e kT_e$ 이므로 전자밀도는 $n_e \approx 3 \cdot 10^{19} / \text{m}^3$ 이다. 식 (2)로부터 중성립자속의 침투깊이는 $\lambda_a \approx 30\text{cm}$ 이다. 이것은 빠른 중성립자속을 입사시킬 때 또까마크의 부반경 a 에 따라 주어지는 침투깊이에 대한 요구조건 $\lambda_a > a/4$ 를 충분히 만족시킨다.

빠른 이온들의 열화시간은 24ms 정도로서 $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형또까마크에서 플라즈마방전의 정상부분의 길이(450ms 정도)보다 작으므로 430ms 수준에서의 입사속임펄스길이를 가질수 있다.

2. $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형또까마크의 NBI체계의 구성과 특성파라메터결정

빠른 중성립자속은 보통 양이온과 음이온을 리용하여 만드는데 우리는 양이온방식을 선정하였다.

NBI체계에서 진행되는 과정들은 고에네르기이온속형성, 이온속의 원자속으로의 전환, 플라즈마에로의 원자속수송과정으로 갈라볼수 있다.

고에네르기이온속형성은 기체방전실에서의 플라즈마발생과 이온광학체계에서의 속추출 및 가속과정이다. NBI체계의 이온원천으로는 LBL형을 선정하고 추출방향에서의 방전실외벽에 영구자석들을 배열하는 방법으로 축방향자기마당을 조성하였다. 방전은 보조가열음극을 리용한 비자립섬초호광방전형식으로 실현하였으며 원천기체로는 중수소를 선택하였다. 일반적으로 LBL형이온원천의 방전실에서의 기체압력은 1Pa 정도이고 기체방전을 위한 전자온도는 $5 \sim 10\text{eV}$ ($T_e > T_i$)이며 플라즈마밀도는 $n_i \approx 10^{18} \sim 10^{19} / \text{m}^3$ 이다.

이온속의 추출과 형성은 여러개의 틈이 있는 이온광학계에 의하여 보장된다. 이온광학계는 방출전극, 부전극, 접지전극으로 구성하였다. 매 전극들은 일정한 크기의 틈들을 배치한 살창들을 결합한 속들로 구성한다. 방전이 진행될 때 음극에 관한 추출전극의 전압은 양극전압의 $1/2$ 에 가깝게 보장한다. 이온광학계를 통과하면서 형성된 빠른 이온속을 중성화하기 위하여 방전전에 방전실로부터 확산되어나온 중성기체가 머무르는 일정한 체적의 중성화기를 속통로방향에 배치하였다.

중성화기와 중성립자수송통로사이에는 체적이 큰 원기둥형태의 완충공간을 만들어주고 중성화기를 통과한 원자속에 섞여있는 이온들을 뽑아내기 위한 수직자기마당을 조성하는 전자석을 배치하였다. 수직자기마당을 통과한 순수한 중성립자속은 수송통로를 거쳐 또까마크진공실외벽과 접해있는 주입창으로 로심플라즈마에 침투되게 된다.

우리가 구성한 $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형또까마크플라즈마가열을 위한 NBI체계의 구성도는 그림과 같다.

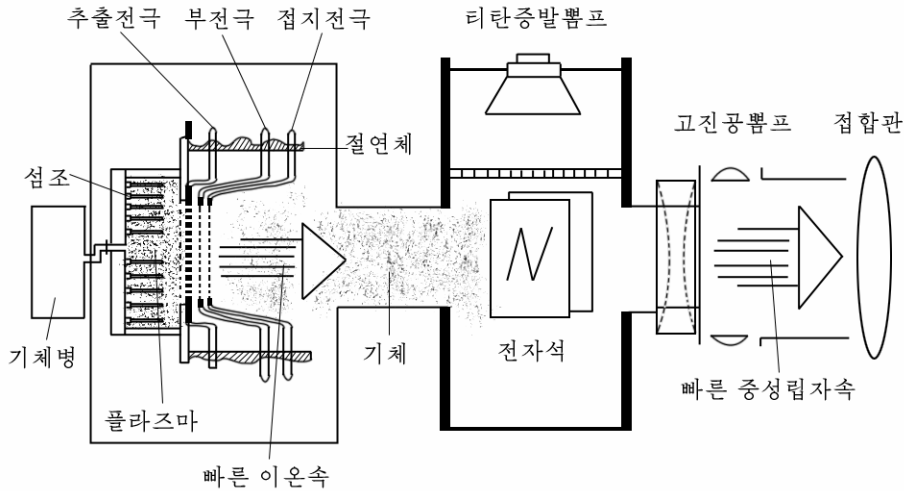


그림. $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형토크마크플라즈마가열을 위한 NBI체계의 구성도

$R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형토크마크플라즈마가열을 위한 NBI체계의 주요특성량들을 결정하였다.

추출이온이 30keV 의 에너지를 가지게 되므로 추출전극과 가속전극사이의 포텐셜차를 다음과 같이 평가할수 있다.

$$eU = 34\text{keV}, U \approx 34\text{kV}$$

$\lambda \propto T/P$, 방온도조건에서 $P=1\text{Pa}$ 일 때 평균자유행로는 1cm 정도이지만 가속마당의 효율을 최대로 보장하기 위해서는 추출전극과 가속전극사이거리 d 를 평균자유행로길이보다 더 작게 선정하여야 한다. 한편 가속전극전압을 감소시키기 위하여서는 d 를 작게 하여야 하지만 d 감소는 등포텐셜이지리짐과 속의 각발산증가를 일으킨다.

최소거리 $d_{\text{최소}}$ 는 전극들사이의 절연과피전압에 의해서도 결정되는데 $U < 50\text{kV}$ 에서 다음과 같다.

$$U_{\text{절}} = 80d_{\text{최소}}^{0.8} \quad (3)$$

여기서 $U_{\text{절}}$ 은 kV 단위로, $d_{\text{최소}}$ 는 cm 단위로 계산된다.

안정한 작업을 위해서는 d 가 절연과피에 의하여 결정되는 값보다 25%정도 커야 하므로 0.45cm 로 설계할수 있다. 이것은 평균자유행로길이보다 작아야 한다는 조건도 충분히 만족시킨다.

최적방출전류밀도 j_+ 는 다음식에 의하여 구할수 있다.

$$j_+ = (KU_{\text{가}}^{3/2})/d_0^2 \quad (4)$$

여기서 K 는 중수소에 대하여 $2.6 \cdot 10^{-8}$ 이며 $U_{\text{가}}$ 의 단위는 V , d_0 (전극두께를 고려한 가속길이)의 단위는 cm 이다.

우리의 경우 전극두께를 1mm 정도로 설계하면 최적방출전류밀도는 $j_+ \approx 0.39\text{A/cm}^2$ 이다.

장치의 주반경 0.8m , 플라즈마고리의 소반경 64cm , 대반경 96cm 와 12개의 토로이달권선과 5개의 폴로이달권선, 그것의 두께 10cm 를 고려하면 속주입창을 설치할 공간의 크기는 $26\text{cm} \times 50\text{cm}$ 이다. 속수송통로벽두께를 5cm 로 보장한다면 중성립자주입창의 최대면적은 16cm

$\times 40\text{cm}$ 이다. 속의 자유로운 수송을 보장하기 위한 평균자유행로정도의 벽사이공간을 조성한다면 실제적인 입사속의 크기는 $14\text{cm} \times 38\text{cm}$ 이다.

따라서 집초전극을 지난 후 나타나는 속의 작은 각분산을 무시한다면 이온원천으로부터의 양이온추출창의 크기도 $14\text{cm} \times 38\text{cm}$ 로 설계할수 있다. 결국 추출전극에서의 이온속의 출력은 $P_i=7\text{MW}$ 로 된다.

한편 일반적으로 이온광학계의 속투과율 48%, 중성화기에서의 중수소이온의 중성화효율 $\eta_{\text{전}} \approx 0.8$, 수송통로에서의 손실률 $\eta_{\text{손}} \approx 0.85$ 인것을 고려하면 실제적인 NBI체계의 입사출력은 $P = \eta_{\text{전}} \eta_{\text{손}} P_i \approx 4.8\text{MW}$ 로 된다.

$R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형토크마크플라즈마가열체계의 특성파라미터들의 설계값은 표와 같다.

우리는 구형토크마크플라즈마가열체계의 물리설계계산에 리용한 방법을 Globus-M장치[2]의 가열체계 계산에 적용하여 비교함으로써 우리가 얻은 결과의 정확성을 검증하였다.

표. NBI체계의 특성파라미터들의 설계값

특성파라미터	설계값
입사속립자의 에네르기	34keV
로심플라즈마밀도	$3 \cdot 10^{19}/\text{m}^3$
입사속의 침투깊이	30cm
입사속임플스길이	430ms
전극사이거리	0.45cm
가속전압	34kV
최적방출전류밀도	$0.39\text{A}/\text{cm}^2$
추출이온속출력	7MW
중성립자속입사출력	4.8MW
추출창의 크기	$14\text{cm} \times 38\text{cm}$
주입창의 크기	$16\text{cm} \times 40\text{cm}$

맺 는 말

$R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형토크마크플라즈마가열을 위한 중성립자속의 입사에네르기는 34keV이다. 이 중성립자속을 리용한 $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ 구형토크마크플라즈마가열체계를 구성하고 체계의 물리설계를 위한 특성파라미터들을 결정하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김일성종합대학학보(자연과학), 56, 1, 87, 주체99(2010).
- [2] В. К. Гусев и др.; Журнал технической физики, 77, 9, 28, 2007.
- [3] Zhon Jing Chen et al.; Fusion Engineering and Design, 87, 325, 2012.

주체105(2016)년 5월 5일 원고접수

Physical Design of NBI System for $R=0.8\text{m}$, $A=1.25$ Spherical Tokamak Plasma Heating

Kim Yong Je, Chae Kwang Il and Kim Mun Ok

The injection particles energy of neutral beam for $R=0.8$, $A=1.25$ spherical Tokamak plasma heating is 34keV. We composed $R=0.8$, $A=1.25$ spherical Tokamak plasma heating system by using this neutral beam and determined characteristic parameters for physical design of the system.

Key words: Tokamak, NBI system