

KAERI/CR-349/2009

KSTAR 장치 성능향상 및 운영

KSTAR Tokamak and Ancillary System Upgrade

ICRF를 이용한 KSTAR 진공내벽 방전세정

Discharge Cleaning on KSTAR Vacuum Wall using ICRF

KAERI

한국원자력연구원

국가핵융합연구소

제 출 문

국가핵융합연구소장 귀하

이 보고서를 "ICRF를 이용한 KSTAR 진공내벽 방전세정"과제의 보고서로 제출합니다.

2009. 12 .

주관연구기관명 : 한국원자력연구원

주관연구책임자 : 곽종구

연구원 : 왕선정

" : 김성규

" ; 배영덕

" : 윤재성

" : 김선호

보고서 요약서

과제고유번호		해 당 단 계 연 구 기 간	2009.2~ 2009.12	단 계 구 분	(해당단계)/ (총 단 계)
연 구 사 업 명	중 사 업 명	국가핵융합연구소 주요사업			
	세부사업명				
연 구 과 제 명	본 과 제 명	KSTAR 장치 성능향상 및 운영			
	위탁과제명	ICRF를 이용한 KSTAR 진공내벽 방전 세정			
연 구 책 임 자	곽종구	해당단계 참 여 연구원수	총 : 명 내부 : 명 외부 : 명	해당 단계 연 구 비	정부 : 천원 기업 : 천원 계 : 천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 6 명 내부 : 5 명 외부 : 1 명	총 연구비	정부:150,000 천원 계 : 150,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국원자력연구원 핵융합공학기술개발부		참여기업명		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	43
ICRF를 이용한 방전세정 연구 - 잔류가스 분석 시스템을 이용한 운전변수에 따른 방전세정의 효과 분석 - 안테나 냉각장치 개선 - ICRF 시스템 변경(자장 변화에 따른 송출기 및 공명루프 조건 변화)					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	KSTAR, ICRF, 방전세정			
	영 어	KSTAR, ICRF, Discharge cleaning			

요약문

I. 제목

- ICRF를 이용한 KSTAR 진공내벽 방전세정

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 안정적인 KSTAR 토카막 shot을 위한 ICRF 방전세정 최적화 필요

III. 연구개발의 내용 및 범위

- ICRF 방전세정 최적화 조건 탐색
- ICRF 시스템 변경 및 개선

IV. 연구개발결과

- 잔류가스 분석시스템을 이용한 ICRF 방전세정 효과 분석
- 안테나 냉각라인 제작 및 설치
- ICRF 시스템 변경(자장 변화에 따른 송출기 및 공명루프 조건 변화)
- ICRF 안테나 콘디셔닝

V. 연구개발결과의 활용계획

- 2010년도 ICRF를 이용한 방전세정 및 토카막 가열 실험에 활용

SUMMARY

I. Project Title

- Discharge cleaning on KSTAR vacuum wall using ICRF

II. Objectives of the project

- Optimization of ICWC for reliable KSTAR tokamak start-up

III. Contents and Scope

- Search of optimal condition of ICWC
- Modification and upgrade of ICRF system

IV. Research Results

- Analysis of ICWC effect of operational parameters using Residual Gas Analyzer(RGA)
- Fabrication and installation of antenna cooling system
- Modification of ICRF system
- ICRF antenna conditioning

V. Plans for application

- Application to ICRF assisted discharge cleaning and heating experiment during 2010 KSTAR experiment campaign

CONTENTS

1. Introduction	7
1.1. Motivation of the research	7
1.2. The research goal	9
1.3. System of the research	9
2. Contents and results of R&D activities.....	10
2.1. Modification of the resonance loop.....	10
2.2. Modification of the transmitter frequency.....	16
2.3. Calibration of the probe	17
2.4. Tuning of ICRF resonance loop.....	20
2.5. Installation of antenna cooling system.....	23
2.6. Antenna conditioning.....	24
2.7. ICRF assisted wall cleaning.....	26
2.8. Lessons and future works	40
3. Conclusion.....	42
4. Reference.....	43

목 차

제1장 과제개요	7
1절. 연구개발 배경	7
2절. 연구목표	9
3절. 연구추진체계	9
제2장 주요 연구수행 내용	10
1절. 공명루프 주파수 변경	10
2절. 송출기 운전 주파수 변경	16
3절. 프로브 교정	17
4절. 공명루프 주파수 정합	20
5절. 안테나 냉각관 설치	23
6절. 안테나 콘디셔닝	24
7절. ICRF 방전세정	24
8절. 향후 수행 할 일	40
제3장 결론	42
제4장 참고문헌	43

제1장 과제개요

1절. 연구개발 배경

토카막에서 방전세정은 토카막 start-up의 재현성, 신뢰성을 증가시키고 불순물에 의해 플라즈마 냉각을 막아 핵융합 플라즈마를 높은 온도까지 가열할 수 있게 하는 매우 중요한 프로세스이다. 토카막 start-up에서 전류의 증가는 초기 플라즈마의 온도와 밀도에 의존하는데 이때 방전 가스의 양이 이러한 플라즈마 변수들을 조절하는데 중요한 역할을 한다. 그런데 방전 가스의 양은 밸브를 통해서 조절을 할 수 있는 부분도 있지만 토카막 벽면에 흡착되어 있던 방전 가스가 플라즈마의 발생과 함께 벽면에서 탈리되어 플라즈마에 공급되는 현상이 나타난다. 이러한 현상은 인위적으로 그 양을 조절하기 힘들므로 방전세정을 통해 처음부터 그 양을 줄임으로써 초기 플라즈마 발생에 영향을 미치지 않도록 하고 있다. 한편, 플라즈마 벽면에 흡착되어 있는 수분, 탄소 화합물, 산소화합물 등의 불순물들은 플라즈마 구동과 함께 지속적으로 플라즈마에 유입되어 플라즈마를 냉각시킴으로써 플라즈마가 높은 온도로 가열되는 것을 저해한다. 따라서, 방전세정을 통해서 이러한 불순물들을 미리 제거해야 한다.

방전세정의 주요과정은 방전 가스를 주입하고 전력을 인가하여 플라즈마를 만든 후 플라즈마에서 생성된 수소나 중수소 이온 또는 반응성 이온을 벽면의 수소나 중수소 또는 불순물과 반응시켜 휘발성 중성입자로 만들고 이를 펌프를 통하여 밖으로 배출하는 방식으로 이뤄진다. 따라서, 효율적인 방전 세정이 이뤄지기 위해서는 벽면에서 불순물들을 잘 탈리시킬 수 있도록 플라즈마 환경을 만들어 주고 탈리된 불순물들을 다시 재이온화를 통해 플라즈마 내에 지속적으로 머물지 못하게 하여 펌프를 통해 밖으로 배출되도록 해야 한다.

기존의 토카막에서 널리 행해진 방전 세정은 GDC(Glow Discharge Cleaning) 방전으로서 그 방법론과 효과들이 비교적 잘 정립되어 있다.[1] 하지만, GDC는 ITER나 DEMO와 같은 강력한 반영구적 초전도 자석을 이용하는 토카막에서 지속적으로 사용할 수 없기 때문에 새로운 방전 세정방법이 필요하다. 따라서, ITER의 연구그룹인 ITPA/SOL 그룹 내부에서도 앞으로 3년 이내에 해결해야할 시급한 연구 주제의 하나로 ICRF 시스템을 이용하는 방전 세정인 ICWC(Ion Cyclotron Wall Cleaning)를 채택하였다.[2] ICWC는 별도의 방전세정 시스템을 구축하지 않고 수십

MHz 대역의 ICRF 시스템을 이용하여 토로이달 자기장이 인가되어 있는 상태에서 저온 플라즈마를 발생시켜 불순물을 제거하는 세정 방법이다. ICWC에서는 보통 He+D₂, He+H₂ 혼합 가스를 이용하여 방전세정이 주를 이루고 있으나 최근에는 불순물과 잘 반응하여 휘발성 가스를 만들어내도록 N₂, O₂, NH₃와 같은 반응성 가스를 이용한 방전세정 연구도 진행되고 있다.[3] 물론, 반응성 가스는 토카막 벽면을 오염시키지 않을 정도로 작은 양이어야 하며 표준 가스를 이용한 ICWC에서 제거할 수 있어야 한다. 한편, ICRF를 이용한 저온 플라즈마는 GDC 플라즈마에 비해 상대적으로 온도가 높아 불순물의 재이온화되어 자기장에 갇혀 밖으로 잘 배출되지 않을 가능성이 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안도 연구되어야 한다.

2008년도 KSTAR 최초 플라즈마 발생실험에서 ICRF를 이용한 방전세정을 수행하였다. TF자장이 1.5T인 조건에서 20-30 kW의 RF 출력을 성공적으로 인가하여 ICRF 방전을 성공적으로 발생하여, 매 방전과 방전사이의 휴지기 동안 『between shot』 으로 방전세정을 실시하여 진공내벽을 세정하였다. 2009년도에는 토카막 start-up에 대한 재현성과 신뢰성을 확보할 수 있도록 효과적인 ICWC 운전 조건을 찾는 실험을 수행하였다. 그런데 전년도와 달리 TF 자장이 1.5T에서 3T로 증가하였고 이온 가열을 위한 ICRF 주파수도 30MHz에서 45MHz로 증가하였다. 따라서 ICWC를 위한 ICRF 준비 단계로서 주파수 변경에 따른 공명루프 변경, 송출기 운전 주파수의 변경, 공명루프 주파수 정합 등의 시스템 변경 작업을 먼저 수행하였다. 한편 장펄스의 ICRF 전력을 인가하기 위해 냉각관도 추가로 설치하였고 본격적인 ICRF 전력 입사를 위한 안테나 콘디셔닝 실험도 수행하였다. 요약하면 2008년도 실험을 바탕으로 ICRF 방전세정에서 향후 개선사항으로 지적된 다음의 사항을 중심으로 2009년도에 연구개발을 수행하였다:

- 방전세정의 정량적 분석
- ICRF 시스템 개량(자장변화에 따른 송출기 및 공명루프 조건 변화)
- 안테나 냉각장치 개선
- 또한 수직자장을 인가하여 실험을 실시

2절. 연구목표

따라서 연구개발의 목표와 내용은 표 1과 같다.

연구기간	연구개발목표	연구개발내용 및 범위
2009.2 -2009.12	KSTAR 진공내벽 에 대한 ICRF를 이용한 방전세정 최적화	- 차등배기 잔류가스 분석시스템을 이용한 ICRF 방전세정 효과 분석 - 안테나 냉각라인 제작 및 설치 - ICRF를 이용한 방전시 수직자장 인가효과 - ICRF를 이용한 Boronization 방전 시도

표 1. 연구개발 목표, 내용 및 범위

3절. 연구개발 추진체계

연구개발은 KSTAR ICRF 장치 개발을 담당한 한국원자력연구원이 중심이 되어 ICRF 방전세정실험에 필요한 사전 업무를 파악하고, 장치 개선시 설계에 필요한 자문을 수행하였으며, 구체적인 운전과 장치의 유지보수 등의 업무는 국가핵융합연구소 KSTAR 운영사업단의 가열시스템연구팀과 공동으로 수행하였다.

제2장 주요 연구수행 내용

1절. 공명루프 주파수 변경

공명루프는 안테나의 current strap (전류띠)에 적절한 크기와 위상의 전류를 공급하기 위한 것으로 기본 구성은 그림 1과 같다. 총 4개의 전류띠 중 외곽의 2 개를 제외하고 중앙부 2개의 전류띠를 구동하기 위하여 두개의 공명 루프가 형성되어 있으며 이 2개의 공명루프는 병렬로 연결되어 있다. 각 공명루프의 기본 조건은 구동 주파수에서 정상파를 형성하여야 하며, 전류띠 중앙의 접지점에서 상하 전류의 위상이 180도의 차이가 발생하여야 한다.

2009년 KSTAR 실험 campaign을 위해서 ICRF 시스템의 주파수는 44.2 MHz로 변경되었다. 따라서 30 MHz에 적합하도록 설치된 기존의 공명루프에 대한 변화가 불가피하게 되었다. 주요 내용은 공명루프 2번과 3번 각각의 길이, 즉 그림 2의 L_{2T}, L_{2B}, L_{3T}, L_{3B}를 44.2 MHz에 공명이 되도록 변경하고, 2번과 3번이 병렬로 연결된 다음 유체 튜너까지의 길이 L₂₃을 변경한 것이다.

공명을 유지하고 상/하 전류띠 간의 위상차를 180도로 유지하기 위한 조건은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} L_{2T} + L_{2B} &= (n + 1)\lambda \\ |L_{2T} - L_{2B}| &= (m + 1/2)\lambda \\ L_{3T} + L_{3B} &= (n + 1)\lambda \\ |L_{3T} - L_{3B}| &= (m + 1/2)\lambda \\ |L_2 - L_3| &= (l + 1/2)\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

이때 n, m, l은 임의의 0을 포함한 양의 정수이고 λ 는 전송선상의 파장이며 전송선상의 위상속도가 일정하지 않음에 유의해야 한다. L₂와 L₃의 관계식은 전류띠 2번과 3번간의 위상차를 180도로 유지하기 위한 것이다. 손실을 최소화하기 위하여, 조립이 가능하고 전송선의 길이를 최소로 유지할 수 있는 길이를 계산한 바, n=4, m=0, l=0이 선택되었다.

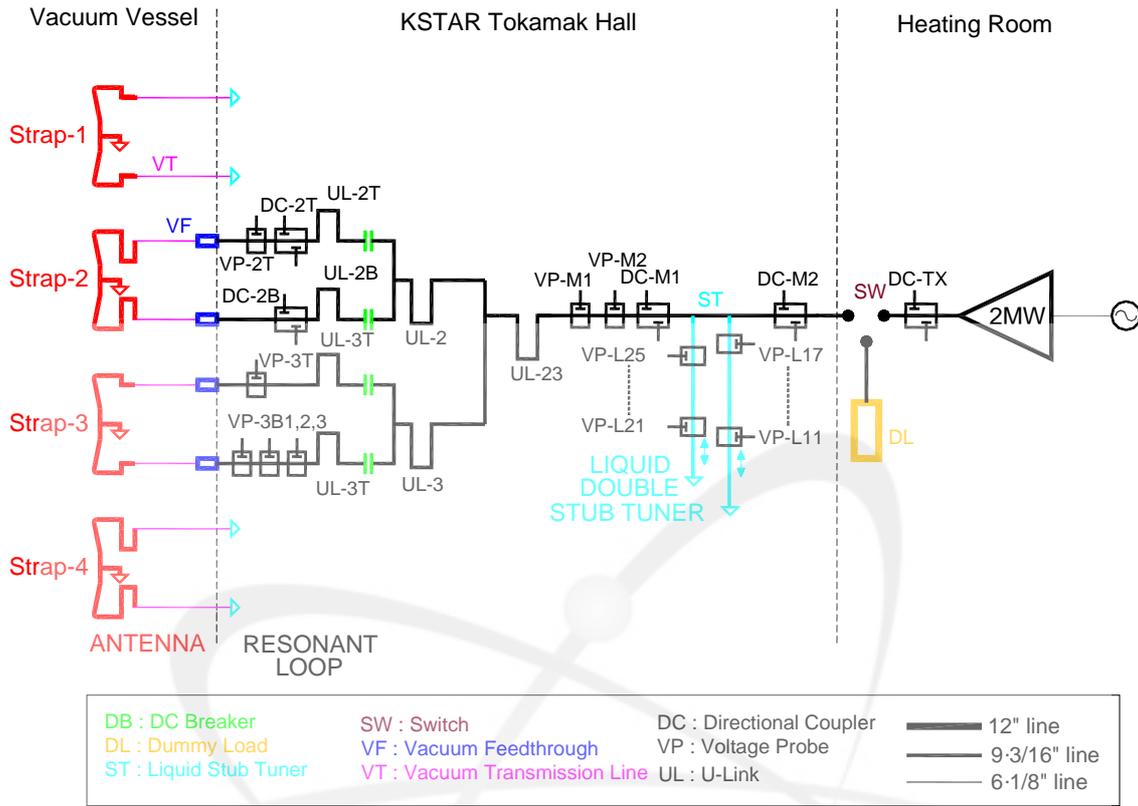


그림 1. 2009년 캠페인 ICRF 회로

선택된 전기적 길이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L_{2T,3T} &= 15.161 \text{ m} \\
 L_{2B,3B} &= 18.530 \text{ m} \\
 L_2 &= 7.878 \text{ m} \\
 L_3 &= 11.211 \text{ m} \\
 L_{23} &= 6.553 \text{ m}
 \end{aligned}$$

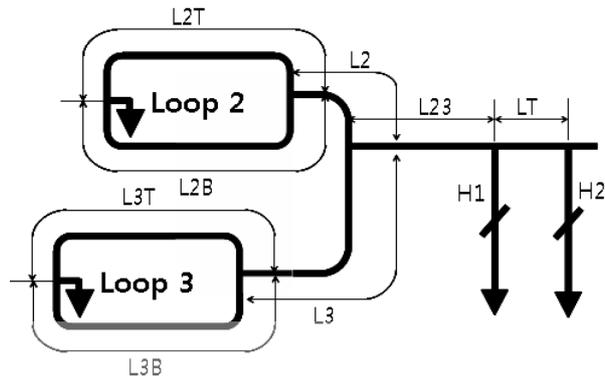


그림 2. 공명루프와 튜너 회로의 전기적 길이 조정

공명루프의 길이는 그림 1의 U-Link, UL을 조정하여 이루어진다. UL-2B,T 및 UL-3B,T는 24인치 엘보우 2개와 직선관 2개로 이루어지며, UL-2,3과 UL-23은 24인치 엘보우 2개, 수직 직선관 2개 및 수평 직선관 1개로 이루어진다. 엘보우 2개를 포함한 UL-2T,B 및 UL-3T,B의 길이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 UL_{2T} &= 5.219 \text{ m} \\
 UL_{2B} &= 3.085 \text{ m} \\
 UL_{3T} &= 5.672 \text{ m} \\
 UL_{3B} &= 3.851 \text{ m}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

UL-2는 기존의 것을 그대로 사용하였으며 UL-3은 1.667m의 직선관 2개를 수직 부분에 추가하였고, UL-23은 0.650m의 직선관 2개를 수직 부분에 추가하였다.

그림 3은 공명루프상의 전압 프로우브 VP-2B와 VP-3B를 이용하여 측정된 전압을 토대로 공명루프상의 전압비와 안테나 전류비의 전류를 계산한 결과이다. 이 전 캠페인에서는 2번과 3번 루프의 전압이 상이하였으나, 본 구성에서는 44.5 MHz 부근에서 전류비가 1에 근접함을 확인할 수 있다. 루프간 위상차 또한 44.5 MHz에서 180도임을 확인할 수 있다. 그러나 특정 주파수를 제외하고는 전류비가 1에서 큰 값으로 벗어나는데, 이는 전류비 상호간의 정전/유도 결합에서 기인하는 것으로 보인다. 반드시 측정을 통해서 운전 주파수를 결정해야 함을 보여준다. 특히 위상차가 설계값이 아닌 주파수는 반드시 피해야만 한다. 그림 4는 UL-23상에 위치하는 Test Port에서 측정된 임피던스이다. Test Port는 L2와 L3이 병렬로 연결되는 부분에서 24인치 떨어진 곳에 위치한다. 루프간의 위상차가 180도가 아닌 곳에서 임피던스상의 공명이 일어남을 알 수 있다.

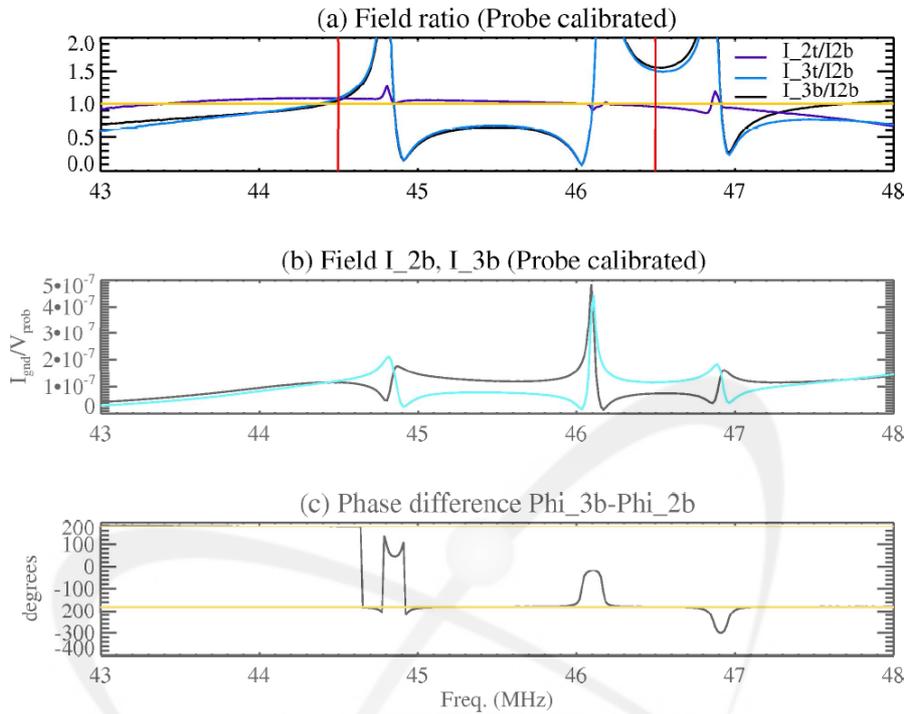


그림 3. 루프/전류띠간 전류비와 위상차

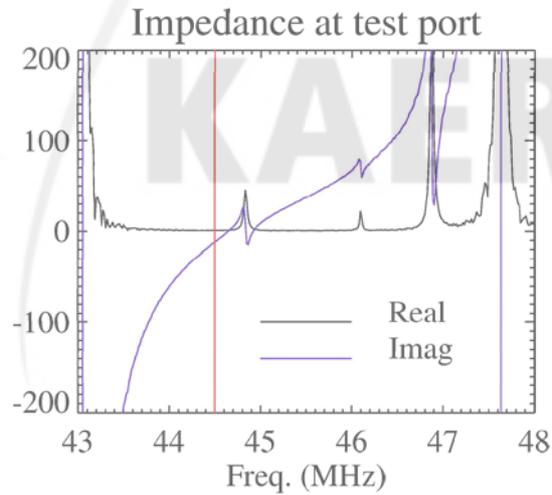


그림 4. 테스트 포트에서의 임피던스

그림 5, 6은 안테나 전류 전류띠의 전압을 오실로스코프를 이용하여 직접 측정 한 파형이다. 전류띠 2와 3은 전압 비율이 1에 근접하고 각각의 위상도 설계값이나, 전압이 직접 가해지지 않은 1번과 4번 전류띠에도 전압이 유도되며 특히 44.5 MHz의 경우 4번 전류띠에 매우 큰 전압이 가해진다. 이는 전류띠간 결합과, 1, 4번 전류띠

의 회로(VT 끝단에서 단락)에서 기인하는 것으로 보인다. 따라서 플라즈마 부하 저항이 충분히 크다면 전류띠간 결합을 무시할 수 있고, 4번에 걸리는 전압은 대폭 줄어들 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위하여 1번과 4번 전류띠에 연결된 VT의 단락을 제거한 상태에서 전압을 측정하였고, 이때는 전압의 양상이 완전히 바뀌는 것을 볼 수 있었다. 한편, 주파수를 낮추자 4번에 걸리는 전압을 줄일 수 있었는데, 이는 그림 3, 4에서 볼 수 있듯이 기생 공명 주파수로 부터 벗어나기 때문인 것으로 이해된다. 따라서 본 캠페인에서는 루프간 전류비를 1에 가깝게 하고 구동하지 않는 전류띠의 전압을 줄이기 위하여 주파수를 44.2 MHz로 결정하였다. 주파수 44.2 MHz에서 측정한 각 전류띠에서의 전압은 그림 6과 같다.

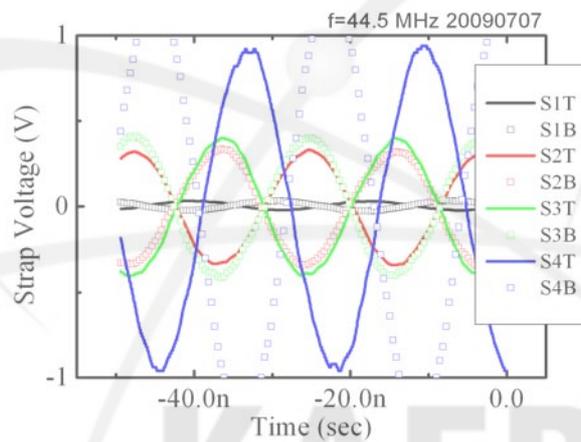


그림 5. 44.5 MHz에서의 안테나 전류띠에서의 전압

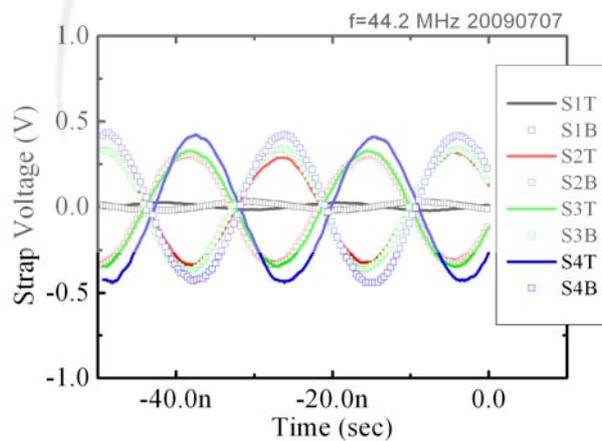


그림 6. 44.2 MHz에서의 안테나 전류띠에서의 전압

그림 7은 유체 스텐브(stub)의 튜닝 영역을 표시한다. 44.2 MHz에서 튜너의 부하

측이 표시된 영역이면 2개의 튜너를 이용하여 특성 임피던스로 튜닝할 수 있음을 뜻하는데, 푸른색 점은 그림 4의 임피던스 중 44.2 MHz의 임피던스를 표시한 것으로 튜닝이 가능함을 확인할 수 있다. 플라즈마 부하가 발생하면 이 점은 이동할 수 있는데, 확인 결과 플라즈마 부하 저항이 8 Ohm까지 증가하여도 이 점의 위치는 크게 변하지 않는다. 이 결과는 부하저항이 변화하여도 튜너를 재조정할 필요가 없음을 뜻하지는 않는다. 이 점은 공명루프와 그 연결들에 의하여 나타난 것으로, 최종적으로 송출기가 바라보는 반사파를 규정하는 값은 튜너 회로를 거쳐야만 알 수 있다.

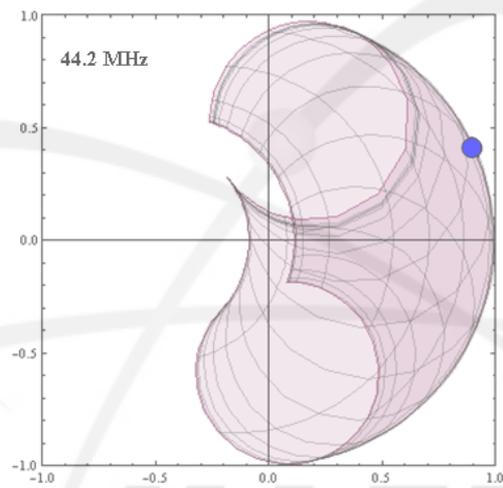


그림 7. 유체스터브의 튜닝 범위

2절. 송출기 운전 주파수 변경

2008년도 운전 시에 설정된 30 MHz의 주파수를 45 MHz로 변경하였고, 성능시험을 수행하였다. 주요 운전 조건은 표 2와 같다. RF pulse는 on/off시간이 0.9s/6s이며, 출력은 647 kW이며, dummy load에 대한 VSWR은 1.37이다.

	Vp kV	Ip A	Vs V	Is A	Vg V	Ig A	Vf V	If A			
FPA	12.5	55	1060	0.8	-510	2.6	15.4	630			
Driver	12.5	10	980	0.01	-373	0	15.5	194			
IPA	4.7	1.7					7.2	48			
	IPA			Driver				FPA			
	In Tune	Out Load	Out Tune	In Load	In Tune	Out Load	Out Tune	In Load	In Tune	Out Load	Out Tune
Position	535	729	140	249	548	777	503	801	1082	100	860

표 2. 송출기 주요 운전 조건

방전세정과 안테나 콘디셔닝을 위해서는 30 kW 미만의 작은 출력으로도 충분하므로 발전기의 출력을 낮추면서 출력값을 측정하였고 그 결과는 표 3과 같다.

Source(dBm)	Forward power(kW)	Forward power(kW)
1.5	334	271
0.5	229	192
-1.5	82	62
-2.5	43	27
-3.5	12	3.8
	FPA screen on	FPA screen off

표 3. 송출기의 출력 측정값

송출기는 45 MHz로 세팅하는 경우 39-49MHz영역으로 운전이 가능하다.

3절. 프로브 교정

운전 주파수가 변경되었으므로 전압 프로브 및 방향성 결합기의 교정이 필요하다. 그림 8, 9, 10은 프로브 교정을 위한 구성을 나타낸다. 점선은 원래의 측정을 위한 배선이고 점선과 겹치는 실선은 교정을 위해 원래의 구성을 대체한 배선이다. 교정을 위한 고주파원으로는 6 dBm 고주파 신세사이저가 사용되었고 최대한 원래의 측정 구성을 유지한 채로 교정되었음을 알 수 있다. 각 프로브의 결합계수 및 최종 교정계수 (Calibration Factor) 를 다음의 표 4에 표시한다. 송출기의 방향성결합기 DCTX-FWD, RFL은 송출기 내부 회로를 거쳐 출력되는 값이며 표에 표시한 결합계수는 이 내부회로를 거친 것임을 유의하여야 한다.

RF Pulse 번호(#)는 교정 데이터가 저장된 데이터 번호를 나타낸다. MDS-plus의 해당 데이터에는 Cal. Fact.가 1이 적용된 Raw data가 저장되어 있다.

한편 전압 프로브 VP2B, VB3B의 위치가 공명루프상의 최대전압의 위치가 아님을 유의해야 한다. 따라서 Cal. Fact.에는 프로브 위치에서의 전압을 최대전압으로 환산한 값이 곱해져 있다. V_{max}/V_{probe} 가 이 값으로 2번 공명루프의 최대 전압은 프로브 위치에서의 전압에 1.21을 곱해야 하며, 3번 공명루프는 $1.81/0.85=2.13$ 을 곱해야 한다.

RF 고주파 Pulse # 1121 및 KSTAR Shot # 2013 이후의 데이터에는 본 교정에서 구한 Cal. Fact. 가 저장되어 있으므로, 고주파 Pulse 데이터는 Unit "Zero to Peak Voltage", KSTAR Shot 데이터는 Unit "kW"을 물리량을 직접 볼 수 있다.

Probe	Coupling coefficient	RF Pulse #	V_{max}/V_{probe}	Cal. Fact.
VP2B	-82	1084	1.21	76785.25
VP3B	-81.6	1084	2.13	133704.13
DC2BF	-80.6	1085	N/A	37624.28
DC3BR	-80.4	1086	N/A	37129.14
DCTX-FWD	-86.9	1109	N/A	26958.77
DCTX-RFL	-77.1	1110	N/A	11045.87

표 4. 전압 프로브의 교정 값

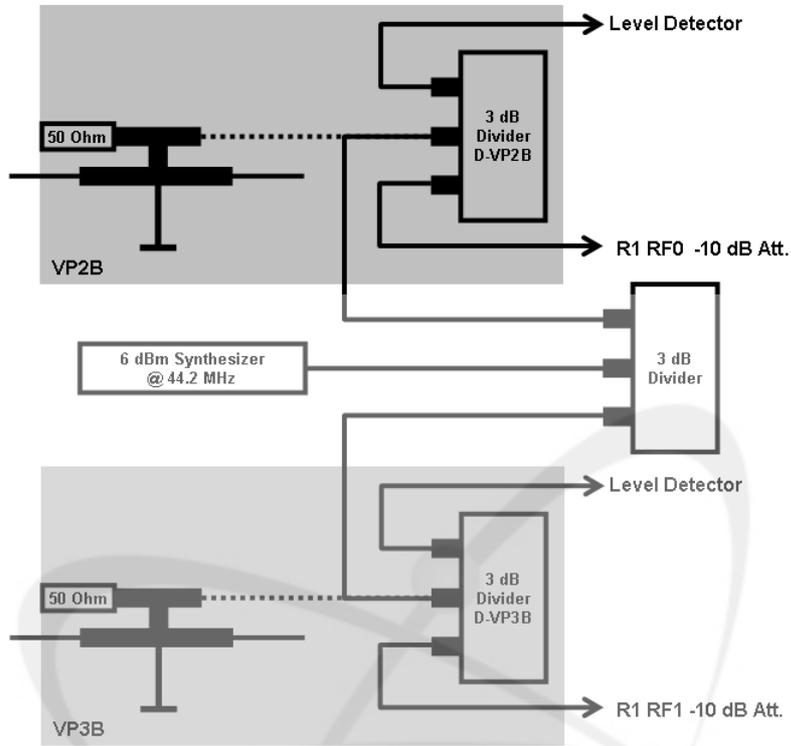


그림 8. VP2B, VP3B 교정을 위한 구성

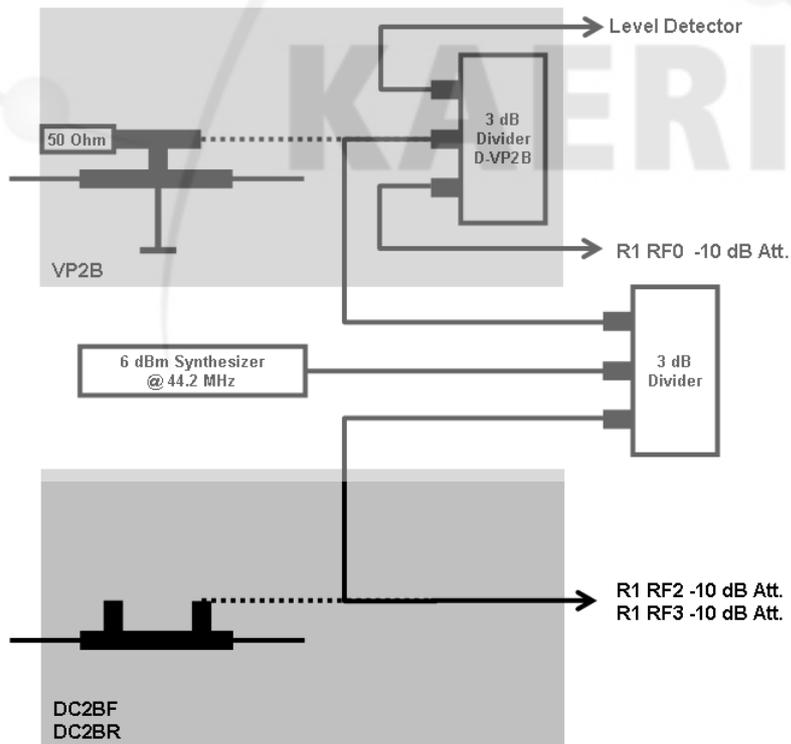


그림 9. DC2BF, DC2BR 교정을 위한 구성

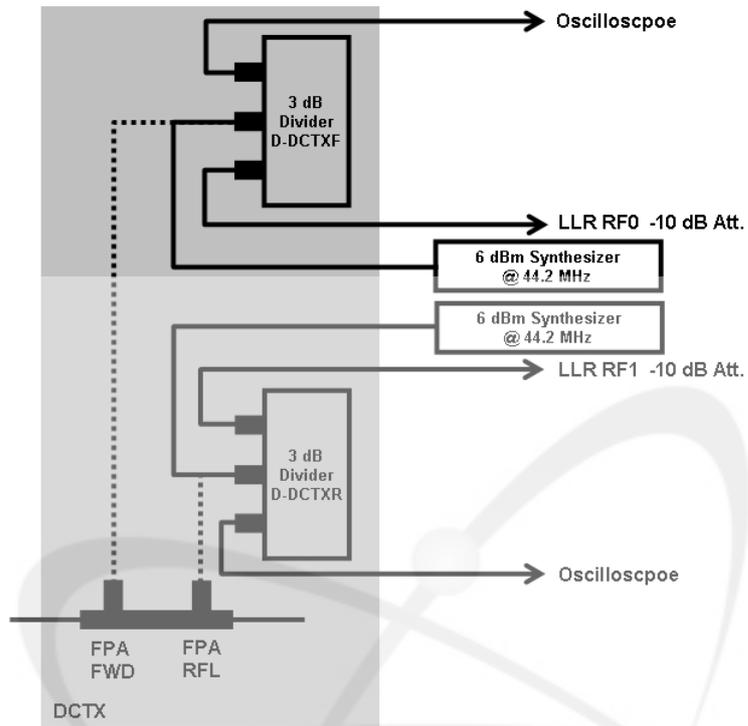


그림 10. DCTX-FWD, RFL 교정을 위한 구성

KAERI

4절. 공명루프 주파수 정합

안테나 콘디쇼닝, RF Glow 방전과 같은 약한 플라즈마에 대한 고주파 결합은 진공 용기 내의 고주파 결합과 크게 다르지 않다. 따라서 전송선을 끊고 회로분석기를 이용하여 튜닝한 다음 전송선을 다시 연결하여 고주파를 입사하여도 VSWR을 1.5 이하로 유지할 수 있다. VSWR을 더 줄이고자 한다면, 이미 임피던스 정합을 위한 스테브의 구성이 완전 정합 조건에 매우 가까우므로 펄스폭을 짧게 하여 송출기의 부하를 줄인 채로 pulse-by-pulse로 VSWR을 줄이는 튜닝이 가능하다.

그러나 토카막 플라즈마와 같은 고밀도의 플라즈마를 대상으로 하면 고주파 부하가 크게 증가하여 송출기의 VSWR 한계를 쉽게 넘고 정합 조건도 진공 때의 그것과는 매우 다르다. 따라서 가능하다면 출력을 인가하기 전에 정합을 하는 것이 좋으나, 플라즈마를 발생시킨 채로 회로 분석기를 연결하는 것은 쉽지 않다. 따라서 최소한의 펄스만을 이용하여 정합을 실시하여야 하는데, 단락 스테브가 Susceptance만 변화시킨다는 것을 이해하면 쉽게 튜닝할 수 있다.

정합이 된 상태에서 부하조건을 유지한 채 송출기측 튜너의 높이 H2를 (그림 2) 변화시키면 반사계수 차트에서 등(等) 콘덕턴스 원을 그리게 된다. 이 때 튜너로부터 측정 위치까지의 길이는 임의의 길이이므로, 이 길이에 의존하는 원의 위치는 고려 대상이 아니다. 반사계수 차트에서 이 원의 위치를 확인한 후, 출력을 최소한으로 하여 송출기의 부하를 줄인 상태에서, 정합하고자 하는 부하를 적용하여 반사계수를 측정하면 정합 조건에서 크게 벗어난 위치의 반사계수를 얻을 것이다. 이제 부하측 튜너의 높이 H1을 가감하면 반사계수의 위치가 변하는데, 이 반사계수가 이전에 확인한 등(等) 콘덕턴스 원에 위치하도록 한다. 만일 등(等) 콘덕턴스 원에 위치하지 못하면 H1의 영역이 부족하여 정합할 수 없는 조건이다. H1을 늘리거나 줄여도 이 원상에 위치시킬 수 있는데 이는 정합의 해가 두개이기 때문이다. 일단 H1을 조정하여 반사계수를 등(等) 콘덕턴스 원에 위치하게 하면, H2를 조정하여 매칭시킬 수 있다. H2의 가감 범위는 원의 위치를 확인할 때의 양과 같다.

그림 11은 튜닝과정을 보여준다. 참고로 “*” 부호와 함께 있는 숫자는 고주파 펄스 번호를 나타낸다. 상대적으로 KSTAR Shot 번호는 “#”으로 표시한다. *1279는 방전세정으로 튜닝한 상태의 반사계수로써 완전한 정합은 아니나 반사파의 크기가 송출기가 감당할 수 있는 범위 내에 있다. H2를 줄여 *1278을 얻었으며, H2를 늘려 *1280과 *1281을 얻었다. 이 네 개의 점을 이용하면 등(等) 콘덕턴스 원을 구할 수 있다.

이제 토카막 방전시 소량의 출력을 입사하면 *1290(#2109)의 반사계수를 얻는다.

H1을 감소시키면 반사계수 점을 원의 아래쪽 호에 위치시킬 수 있고, H2를 증가시켜 완전한 정합을 이루도록 한다. 그림 12의 *1337(#2165)은 반사계수의 최종적인 결과를 보여준다. 점의 크기가 매우 큰 것은 부하의 변동폭이 큰 때문이다.

그림 13에 #2165의 송출기 출력, 반사파 및 공명루프 최대전압을 나타내었다. 출력 파형이 일정하지 않는데 이는 변화하는 반사파에 송출기가 반응한 결과로서, 특정한 반사파의 위상이 송출기 출력을 크게 변화시킬 수 있다.

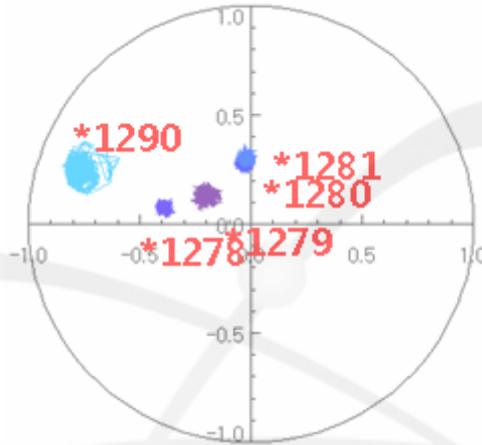


그림 11. 매칭과정의 반사계수 차트.
 *1279는 RF Glow 방전의 반사계수,
 *1278과 *1281은 RF Glow 방전조건에서 H2를 가감하여 얻은 반사계수.
 *1290은 *1279의 튜너 조건에서 토카막 플라즈마 부하의 반사계수. 반사계수의 측정 위치는 송출기 출력단임.

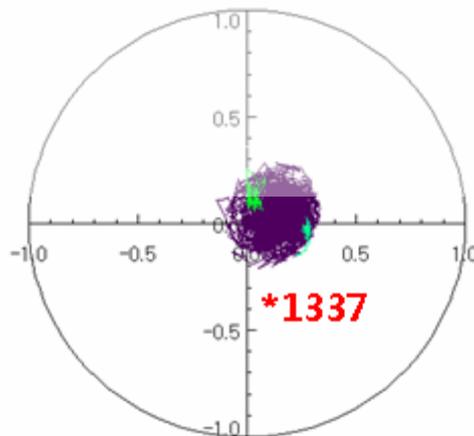


그림 12. 튜닝이 완료된 반사계수

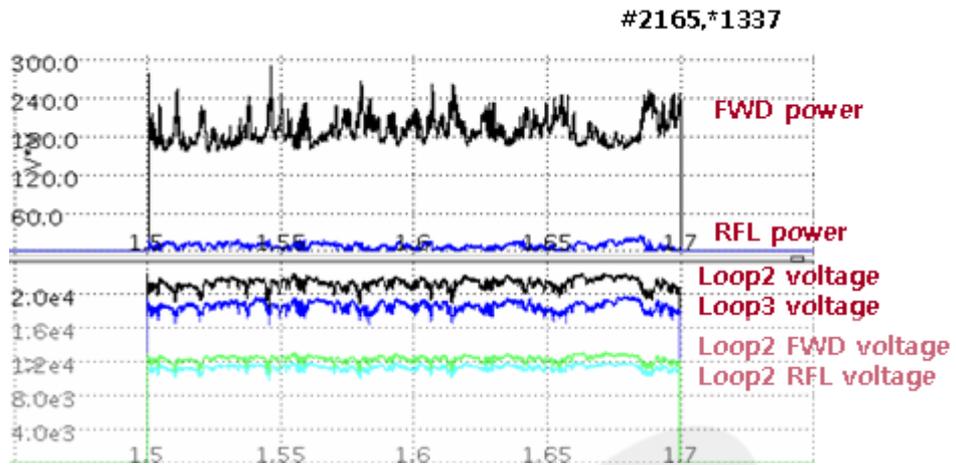


그림 13. 출력과 반사파 및 공명루프 전압 파형

KAERI

5절. 안테나 냉각관 설치

당초 KSTAR 장치에 설치하기 전 한국원자력연구원의 안테나 시험설비에서 측정한 안테나 냉각관로의 유량 및 설치후 시험유량은 표 5와 같다.

	KAERI TS	KSTAR
입출력압력	49/11.7	30.8/19.6
압력강하	37.3 psi	11.2 psi
총유량	5.3 m ³ /h	0.648 m ³ /h
유속(Faraday)	1.2m/s	
유속(진류띠)	2.3m/s	
비고		

표 5. 안테나 냉각관의 시험 결과

한국원자력연구원 시험설비에서의 실험에서는 입력수압을 4기압이상으로 공급하여 실험하였으므로 KSTAR에서도 압력을 증가시키면 설계 사양으로 운전이 가능하다. 2009년도 실험의 경우 열부하가 높지 않으므로 2기압에서 운전하였다.

냉각수 통수실험시 진공챔버의 잔류가스를 모니터링한결과 잔류가스에는 변화가 없었다. 이를 통하여 안테나 내부 냉각배관의 밀폐건전성을 확인하였다. 또한 통수시 배관의 진동이 있었으나 이는 바이패스밸브를 조절하여 진동을 줄였다. 이는 현재 운전 압력이 정격압력보다 낮은 영역에서 발생하는 것으로 정격압력으로 운전하는 경우에는 바이패스밸브를 조금 더 닫아서 조절할수 있다.

6절. 안테나 콘디쇼닝

안테나 콘디쇼닝은 ICRF 안테나에 고주파를 인가할 때 표면기체 방출 증가에 의한 안테나 내부에서의 방전 발생을 억제하기 위해 낮은 출력에서 짧은 펄스를 반복적으로 인가하여 안테나 표면을 세정하는 것이다. 2009년도 KSTAR 캠페인을 위하여 공명루프와 송출기를 수정한 후에(1~3절) 안테나 콘디쇼닝을 수행하였다. 그림 14는 안테나 콘디쇼닝 동안 multi-pactoring 또는 아크 발생에 의하여 전송선 상의 전압이 떨어지고 있음을 보여주고 있다. 그림 15는 지속적인 안테나 콘디쇼닝에 의해 2009년 9월 17일에서 안테나 콘디쇼닝의 압력증가가 9월 8일 보다 크게 작아졌음을 보여준다.

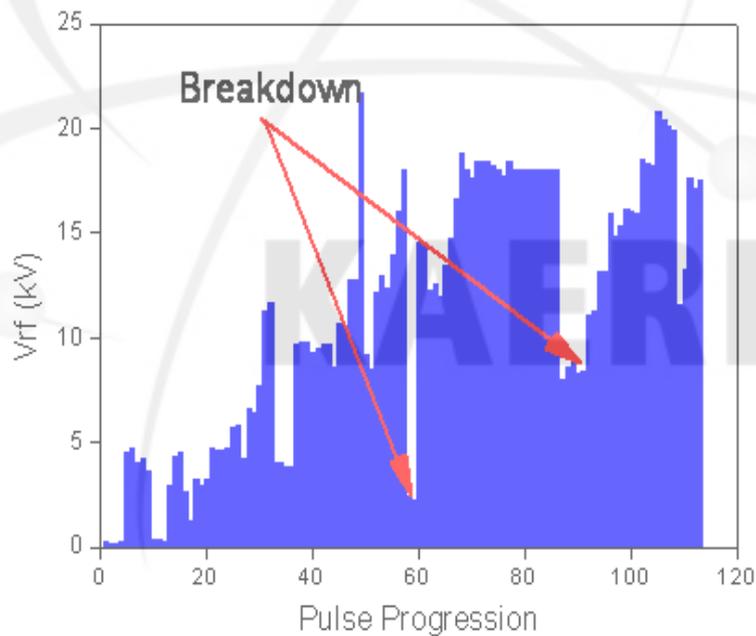


그림 14. 콘디셔닝 동안 전송선상의 전압

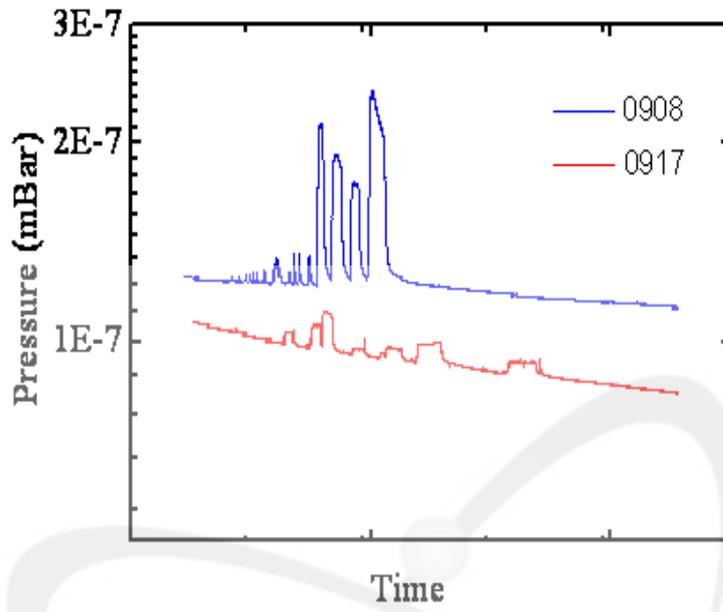


그림 15. 안테나 콘디셔닝시의 압력 변화

KAERI

7절. ICRF 방전세정 (ICWC)

본 연구에서는 표준적인 He+H₂ 가스 안에서 ICWC를 이용하여 벽면에 흡착되어 있는 중수소를 제거하는 방전 세정 실험을 수행하였다. 이는 중수소 토카막 shot에서 초기 start-up에서 재현성과 신뢰성을 확보할 수 있도록 진공용기 벽면에서 중수소를 충분히 제거할 수 있는 적절한 ICWC 운전 조건을 확립하기 위한 것이다.

1. 실험 조건

ICWC에 사용된 KSTR ICRF 시스템은 30~60 MHz에서 작동하는 것으로 2009년 KSTAR 실험 campaign에는 3T에서 H₂ minority heating이 가능한 44.2MHz로 설정하였다. 약 30kW 내외에서 ICWC를 할 수 있도록 튜닝 되었으며 펄스의 duty ratio는 pulse의 파형을 통해 조절하였다.(2장 1절~3절) He과 H₂의 유량은 MFC를 통해 조절하였다.

앞에서 언급하였듯이 본 연구의 주요 목적은 ICWC를 이용하여 D₂를 효과적으로 제거할 수 있는 ICWC 운전 조건을 확립하는 것이다. 따라서, ICWC의 운전 변수에 따른 효과를 파악하기 위해 실험 전에 D₂ GDC를 이용하여 벽면에 중수소를 implant하는 과정을 수행하였다. 재현성과 신뢰성 있는 실험을 위해서는 운전 변수에 대한 효과를 실험하기 이전에 매번 He을 이용한 방전세정과 D₂ GDC를 이용한 implant 과정을 수행하여야 한다. 그렇지만 실험 일정상 매번 그 과정을 수행할 수 없으므로 충분한 시간동안의 D₂ GDC를 수행하여 운전 변수에 대한 ICWC 효과를 실험하는 동안 벽면의 중수소 밀도가 크게 달라지지 않는다는 가정 아래 실험을 진행하였다. ICWC의 효율은 RF pulse 전력 입사시 발생한 수소와 중수소 원자간의 결합에 의해 생성된 HD의 양을 RGA로 측정하여 평가하였다.

실험은 모두 7개 세트로 구성하였으며 각 실험마다 운전 변수에 따라 2~4개의 shot을 배정하였다. 1번과 2번의 실험에서는 He의 유량이 각각 400과 800 sccm 일 때 수소의 유량을 40~160 sccm로 변화시켜가면서 He과 H₂의 혼합비에 따른 ICWC의 효과를 관측하였다. 3번과 4번 실험에서는 고정된 He/H₂ 유량에서, duty ratio에 따른 ICWC 효과를 관측하였다. 5번 실험에서는 고정된 He/H₂ 혼합비가 ICWC에 미치는 효과를 관측하였다. 6번부터 7번까지의 실험은 순수한 He 방전세정에서 He의 유량이 각각 400과 800 sccm일 때 duty ratio의 증가에 따른 ICWC 효과를 관측하였다. 표 5는 요약된 실험 조건이고 표 6은 수행된 실험 pulse shot에 대한 정보이다.

Exp. No.	Mixing Rate	Duty Ratio	Time	Power	Shot num.
1	He(400)/H ₂ (40,80,120,160)	1/9	120	28	2118, 2120, 2121, 2122
2	He(800)/H ₂ (40,80)	1/9	120	32	2140, 2139
3	He(800)/H ₂ (40)	1/9, 2/8, 3/7, 5/5	120	32	2140, 2142, 2143, 2144
4	He(800)/H ₂ (80)	1/9, 2/8, 3/7, CW	120	32	2139, 2146, 2147, 2148
5	He/H ₂ (400/40,600/60,800/80,1000/100)	1/9	120	32	2128, 2145, 2139, 2141
6	He(400)/H ₂ (0)	1/9, 2/8, 3/7, CW	120	32	2123, 2126, 2127, 2129
7	He(800)/H ₂ (0)	1/9, 2/8, 3/7, CW	120	32	2124, 2149, 2150, 2151

표 6. ICWC 실험 세트

Shot Number	B[T]	Gas	Mixing Rate [sccm]	RF power [kW]	Duty(on/off) [sec]	Time [sec]
2118	3	He/H ₂	400/40	28	1/9	120
2120	3	He/H ₂	400/80	28	1/9	120
2121	3	He/H ₂	400/120	27	1/9	120
2122	3	He/H ₂	400/160	28	1/9	120
2123	3	He/H ₂	400/0	27	1/9	120
2124	3	He/H ₂	800/0	27	1/9	120
2125	3	He/H ₂	400/0	27	0.5/9.5	120
2126	3	He/H ₂	400/0	27	2/8	120
2127	3	He/H ₂	400/0	27	3/7	120
2128	3	He/H ₂	400/40	27	1/9	120
2129	3	He/H ₂	400/0	29	CW	60
2139	3	He/H ₂	800/80	33	1/9	120
2140	3	He/H ₂	800/40	32	1/9	120
2141	3	He/H ₂	1000/100	32	1/9	120
2142	3	He/H ₂	800/40	33	2/8	120
2143	3	He/H ₂	800/40	32	3/7	120
2144	3	He/H ₂	800/40	32	5/5	120
2145	3	He/H ₂	600/60	32	1/9	120
2146	3	He/H ₂	800/80	32	2/8	120
2147	3	He/H ₂	800/80	32	3/7	120
2148	3	He/H ₂	800/80	32	CW	60
2149	3	He/H ₂	800/0	32	2/8	120
2150	3	He/H ₂	800/0	32	3/7	120
2151	3	He/H ₂	800/0	32	CW	60

표 7. Pulse shot에 대한 실험 정보

2. 실험 결과

그림 16부터 19까지는 ICRF 파워, 압력, 플라즈마 밀도, 그리고 H_{α} 신호를 측정하는 것으로 shot 2118에 대한 것이다. 각각의 데이터는 잡음 신호가 실려 있어 100~500개의 데이터를 평균하여 그림으로 나타내었다. 2118번 shot에서 ICRF 파워는 10초를 주기로 1초를 ON, 9초를 OFF 하였는데 측정된 ICRF 파워는 이러한 입력을 그대로 보여준다. 플라즈마 밀도는 간섭계에서 측정된 값을 보여주는 것으로 shot에서 ON time 동안 플라즈마 밀도가 그대로 증가하는 것을 알 수가 있다. H_{α} line도 플라즈마가 발생함에 따라 수소에서 방출되는 H_{α} 의 세기를 잘 보여주고 있다.

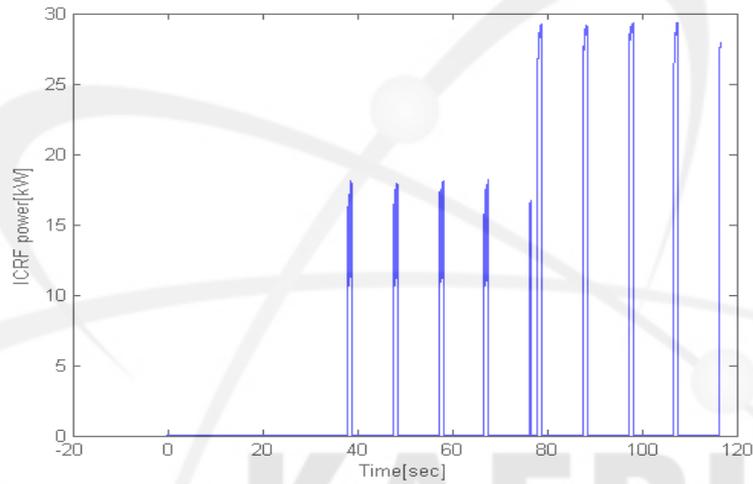


그림 16. ICRF 파워

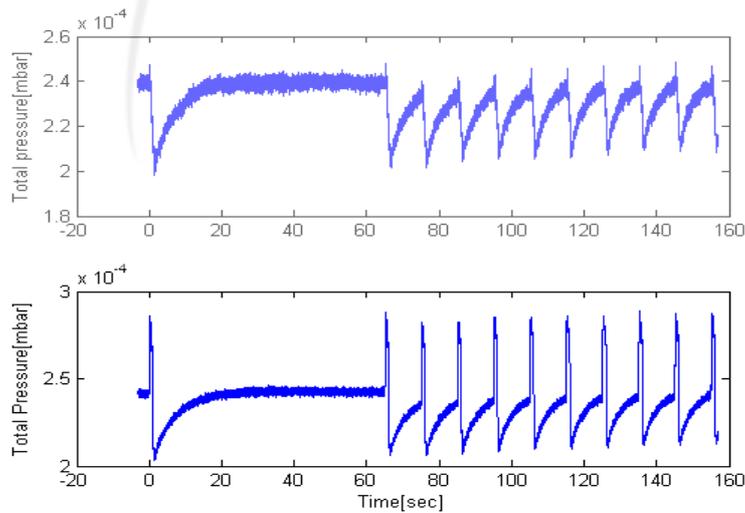


그림 17. 압력 (상 : full range 게이지, 하 : 이온 게이지)

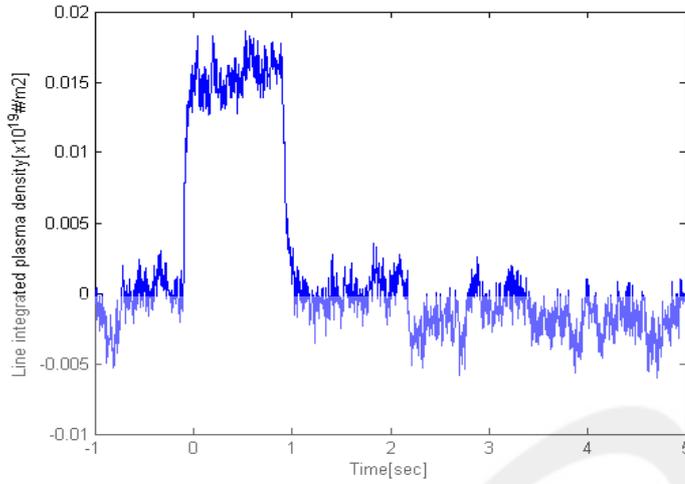


그림 18. 선적분된 플라즈마 밀도

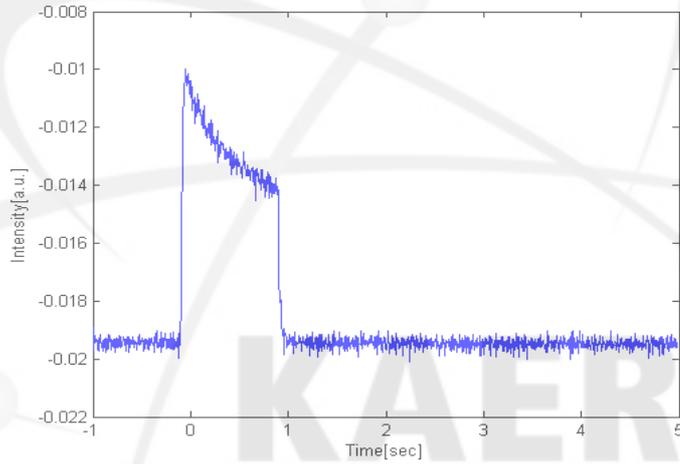


그림 19. H_α 세기 (폴로이달 채널 5)

그림 20과 21은 2118번 shot에서 RGA로 측정된 불순물들의 양을 보여준다. ICWC를 위해 He과 H₂ 가스를 약 400초 부근에서 주입함에 따라 He과 H₂의 압력이 증가함을 알 수가 있다. 한편, 주입된 가스가 아닌 추적된 모든 다른 불순물의 양도 함께 증가하였는데 이는 He 방전을 위해 상대적으로 적은 유량을 가지고 높은 압력을 유지하고 동시에 주 진공배기 계통의 Cryo-Pump에 대한 가스 부하를 줄이기 위하여 Cryo-Pump의 게이트 밸브를 닫았기 때문이다. 한편 방전가스를 주입한지 약 400초 후에 ICWC 방전이 성공적인지 확인하기 위하여 이에 대한 시험 펄스 전력을 입사하였다. 전력이 입사됨에 따라 주 방전 가스인 H₂의 양이 급격히 줄어든 반면 He의 양은 거의 변화가 없다. 한편 모든 불순물의 양은 증가하였는데 이는 방전에 의해 발생한 수소와 헬륨이온이 용기 벽면에 흡착되어 있던 불순물들

을 방출시켜 생긴 것이다. 시험 펄스 전력 입사 후 본격적으로 실험 조건의 duty ratio에 따른 펄스 전력이 입사되며 이 때 불순물의 양은 전력 입사의 ON, OFF에 따라 증가와 감소를 반복하게 된다.

ICWC 효과를 정량적으로 살펴보기 위해 표 6에 요약된 H₂ 유량 또는 RF pulse의 duty ratio에 따른 불순물의 증가량을 살펴보았다. 이때 이러한 불순물의 증가량이 그 의미를 갖기 위해서는 방전을 위한 가스 주입시 불순물의 유입이 없어야 하며 용기 벽면의 표면 상태가 동일하여야 한다. 본 실험에서는 용기 벽면의 표면 상태가 동일하도록 D₂ GDC를 통하여 ICWC 실험 이전에 D₂를 GDC를 통하여 챔버 벽면에 흡착하였다.

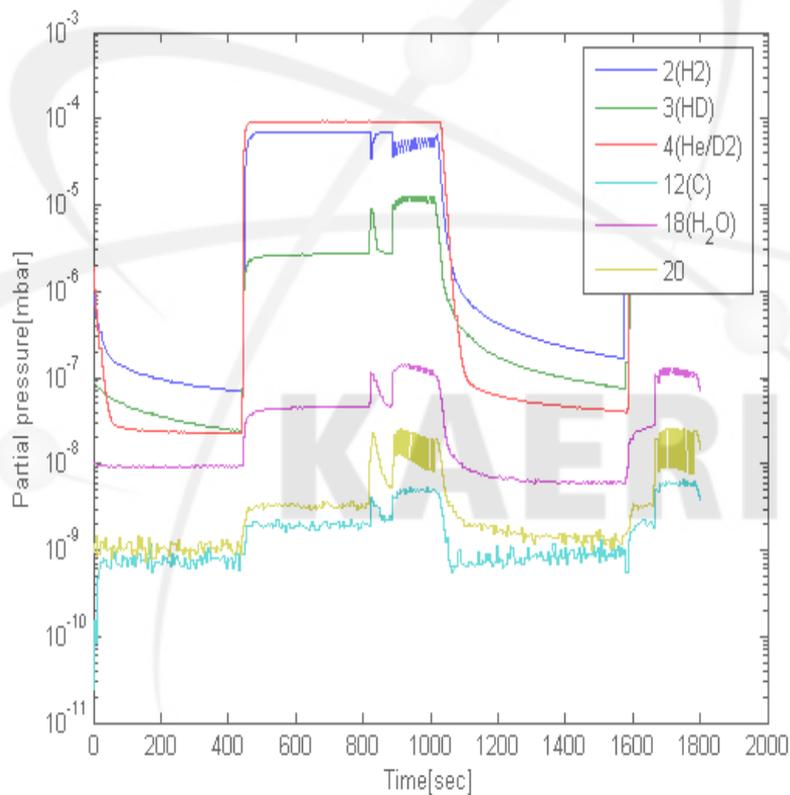


그림 20. 가스질량별 가스 분압 (A = 2, 3, 4, 12, 18, 20)

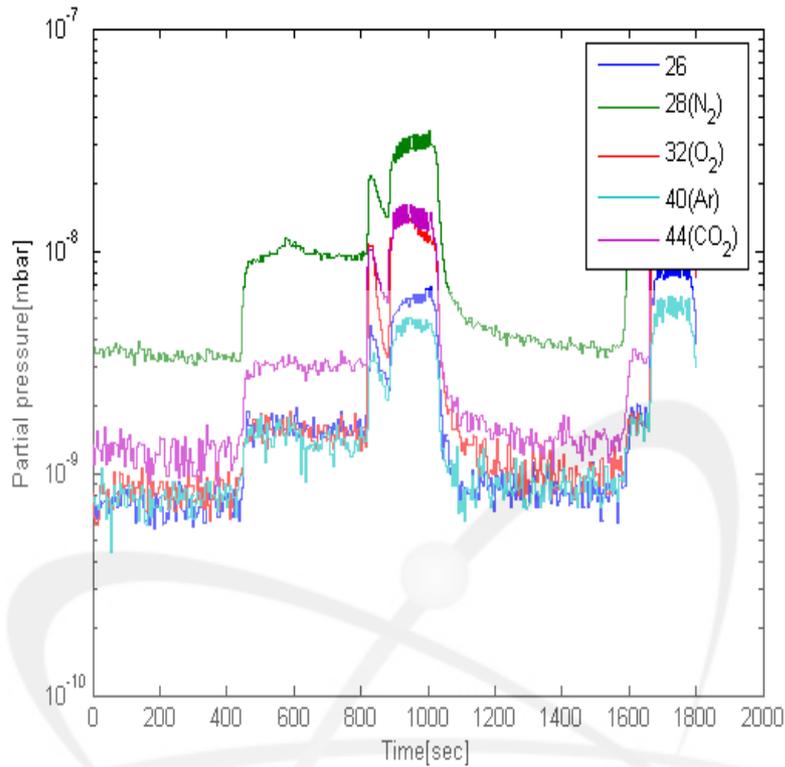


그림 21. 가스질량별 가스 분압 (A = 26, 28, 32, 40, 44)

ICWC 효과에 대한 평가는 앞에서 언급한 것처럼 HD의 양을 RGA로 측정하여 평가하였다. 그림 20에서 보는 바와 같이 HD의 양은 He과 H₂ 가스 주입시 Cryo-Pump의 게이트 밸브를 닫는 관계로 같이 증가하였다. 따라서, ICWC에 의해 벽면으로부터 분리되어 생성된 HD의 증가량은 RF pulse 인가시 HD의 부분압에서 He과 H₂의 Pre-filling시 HD의 부분압을 빼어 계산하였다. 한편 위와 같이 평가한 HD의 증가량은 같은 전력을 입사하더라도 H₂나 He의 유량에 따라 플라즈마의 밀도가 달라지고 그에 따른 영향을 받기 때문에 플라즈마 밀도에 대하여 그 값을 규격화하여 나타내었다.

다른 불순물들의 변화량에 대한 평가는 모든 실험 shot에 대하여 벽면에 동일한 양의 불순물이 흡착되어 있다는 가정을 하기가 어렵기 때문에 ICWC 운전 변수에 따른 불순물의 제거 효율을 평가하기에는 어려운 점이 있다. 다음은 표 5의 실험 세트에 대한 ICWC 효율을 살펴 본 결과이다.

가. He(400)/H₂(40, 80, 120, 160) mixing rate가 ICWC에 미치는 영향 (2118, 2120, 2121, 2122)

그림 22는 He 400 sccm에 대하여 수소의 유량을 각각 40, 80, 120, 160 sccm 으로 했을 때 규격화된 HD의 변화량을 나타낸 것이다. H₂의 유량이 커질수록 ICWC에 의해 HD 증가량이 커지는 것을 알 수가 있는데 이는 플라즈마의 수소 이온의 비율이 커지고 결과적으로 벽면의 D원자와 반응하여 HD를 생성할 가능성이 커졌기 때문인 것으로 생각된다. 한편 H₂의 유량이 160 sccm 일때는 오히려 HD 부분압이 조금 떨어지는 것을 알 수 있는데 이는 ICWC를 진행함에 따라 벽면에 흡착되어 있던 중수소의 밀도가 줄어들기 때문인 것으로 추정되나 정확한 원인은 보다 제어된 실험을 통해 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

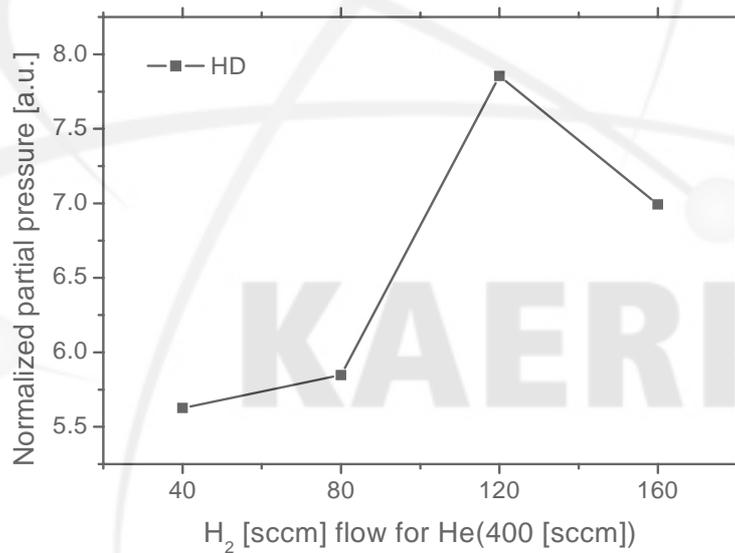


그림 22. He(400)/H₂ 방전에서 H₂의 유량에 따른 HD 부분압

나. He(800)/H₂(40,80) mixing rate가 ICWC에 미치는 영향 (2140, 2139)

그림 23은 He 800 sccm에 대하여 수소의 유량을 각각 40, 80 sccm을 흘려주었을 때 규격화된 HD의 변화량을 나타낸 것이다. 가.의 경우와 같이 H₂의 유량의 증가에 따라 ICWC 효율이 증가하는 것으로 나타났다.

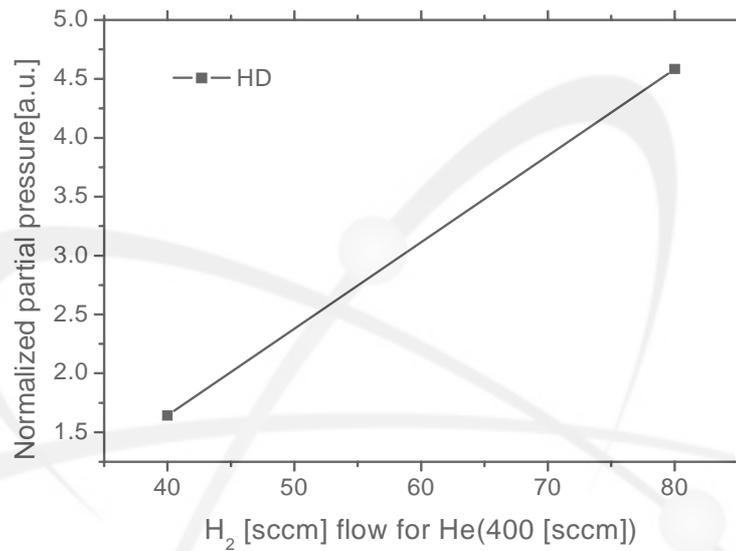


그림 23. He(800)/H₂ 방전에서 H₂의 유량에 따른 HD 부분압

다. He/H₂(800/40) mixing discharge에서 duty ratio(0.1, 0.2, 0.3, 0.5)가 ICWC에 미치는 영향 (2140, 2142, 2143, 2144)

그림 24는 Duty ratio가 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 인 경우에 ICWC 효율을 HD의 부분압으로 본 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 duty ratio가 증가할수록 ICWC 효율도 증가한다. 이는 duty ratio가 증가함에 따라 플라즈마와 표면의 반응시간이 길어지고 이에 따라 벽면에서 제거되는 중수소의 양이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. Duty ratio가 0.2일때 그 값이 떨어지는데 이는 실험 전에 2141번 shot에서 He/H₂(1000/100) 실험을 통해서 벽면의 D₂ 양이 상당히 줄었기 때문인 것으로 추정된다.

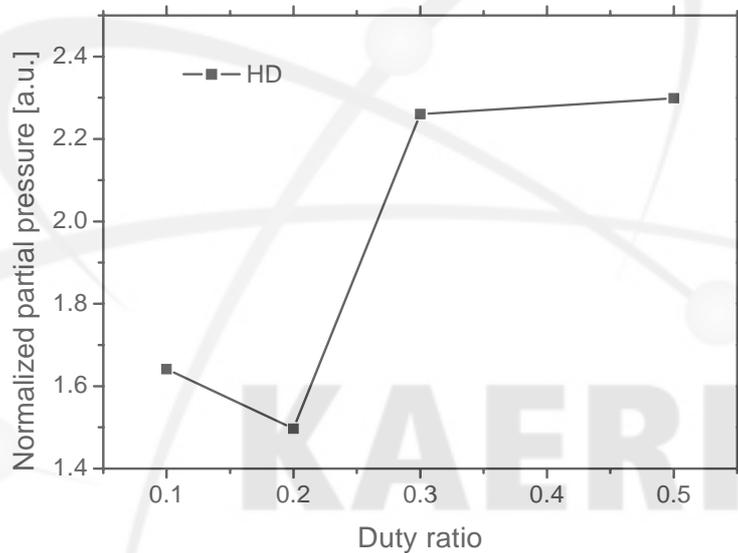


그림 24. He/H₂(800/40) 방전에서 duty ratio에 따른 HD 부분압

라. He/H₂(800/80) mixing discharge에서 duty ratio가 ICWC에 미치는 영향 (2139, 2146, 2147, 2148)

그림 25는 He/H₂의 유량이 800/80 sccm 일때 duty ratio가 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 인 경우에 ICWC 효율을 HD의 부분압의 변화로 본 것이다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 연속적인 2146, 2147, 2148 번 shot의 경우에 duty ratio가 증가할수록 ICWC 효율도 증가한다. 이는 다항에서 설명한 것처럼 duty ratio가 증가함에 따라 플라즈마와 표면의 반응시간이 길어지고 이에 따라 벽면에서 제거되는 중수소의 양이 증가하기 때문인 것으로 생각된다. duty ratio가 0.1인 2139번 shot의 경우에는 duty ratio가 작음에도 불구하고 duty ratio가 더 큰 2146~2148번 shot보다 그 값이 더 큼을 알 수 있는데, 이 결과는 2139과 2146번 shot 사이에 6번의 shot을 통해서 벽면의 D₂ 양이 상당히 줄었기 때문인 것으로 추정된다.

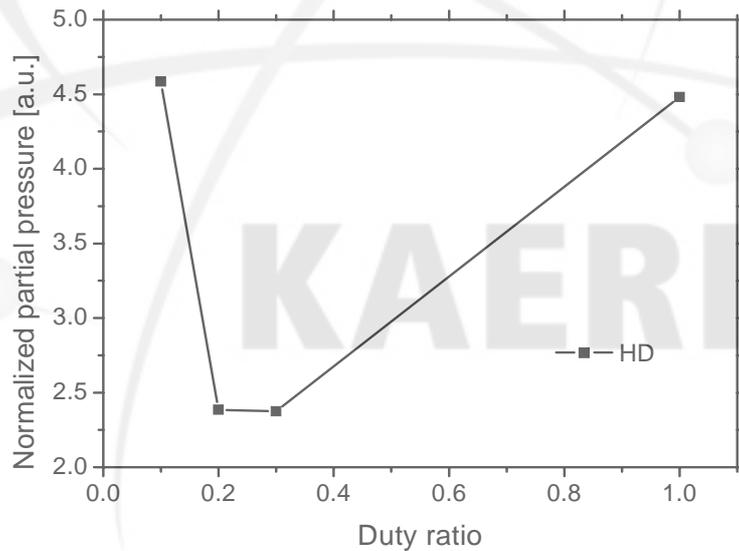


그림 25. He/H₂(800/80) 방전에서 duty ratio에 따른 HD 부분압

마. He/H₂(400/40,600/60,800/80,1000/100) mixing discharge에서 같은 혼합비가 ICWC에 미치는 영향 (2128, 2145, 2139, 2141)

그림 26은 He과 H₂의 유량 혼합률이 10:1이 되도록 일정하게 유지하면서 ICWC 효과를 나타낸 것이다. He과 H₂의 혼합률이 같고 플라즈마 밀도에 대하여 HD의 증가량이 규격화 되어있기 때문에 ICWC의 효율은 같을 것으로 예측되어지는데 실제 관측되는 양상은 좀 더 복잡한 것으로 보인다. 차후에는 보다 향상된 제어 실험이 요구된다.

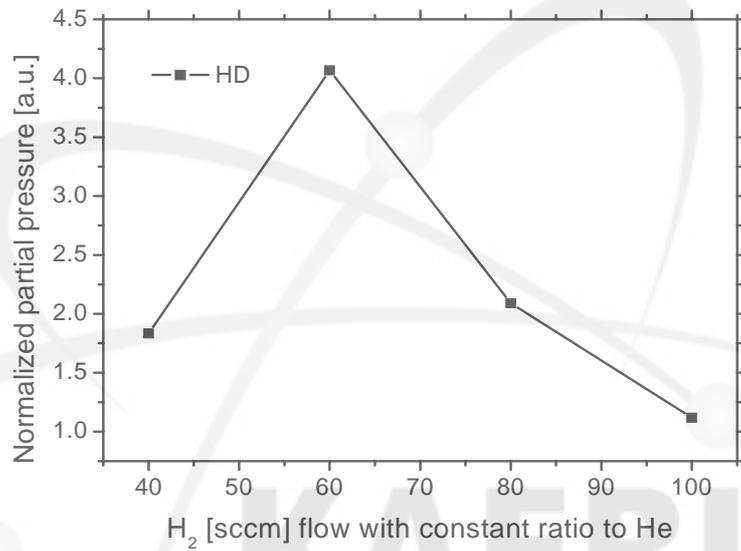


그림 26. He/H₂(800/80) 방전에서 같은 혼합률에 따른 HD 부분압

마. Pure He(400) discharge에서 duty ratio가 ICWC에 미치는 영향 (2123, 2126, 2127, 2129)

그림 27에서 볼 수 있는 바와 같이 duty ratio가 커질수록 ICWC 효율이 증가하는 것을 알 수가 있다. 순수 He만을 주입하여 방전세정을 하였으므로 주로 표면에 흡착되어 있던 수소와 중수소가 He 이온의 도움을 받아 결합하여 탈리되는 것으로 볼 수가 있는데 duty ratio가 커질수록 플라즈마와 벽면의 원자와 반응시간이 길어진 관계로 ICWC 효율이 증가하는 것으로 생각된다. 한편 수소를 첨가하지 않은 관계로 이전의 수소와 혼합하여 방전세정을 한 경우에 비교하여 탈리된 HD의 양이 1/10 이하로 나타났다.

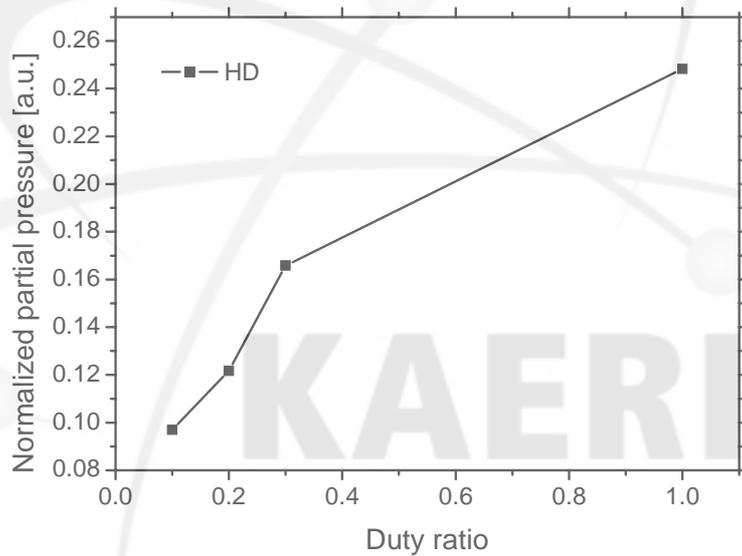


그림 27. 순수 He(400) 방전에서 duty ratio에 따른 HD 부분압

사. Pure He(800) discharge에서 duty ratio가 ICWC에 미치는 영향 (2124, 2149, 2150, 2151)

바 항의 경우와 같이 duty ratio가 커질수록 ICWC 효율이 증가하는 것을 알 수가 있다. Duty ratio가 0.2인 2149번 shot의 경우에 갑작스런 증가가 보이는데 이는 2148번 shot에서 He/H₂를 800/80의 혼합 비율로 60초간 연속운전을 하여 표면에 상대적으로 H₂가 implant 되어서 이러한 결과를 나타낸 것으로 추정된다.

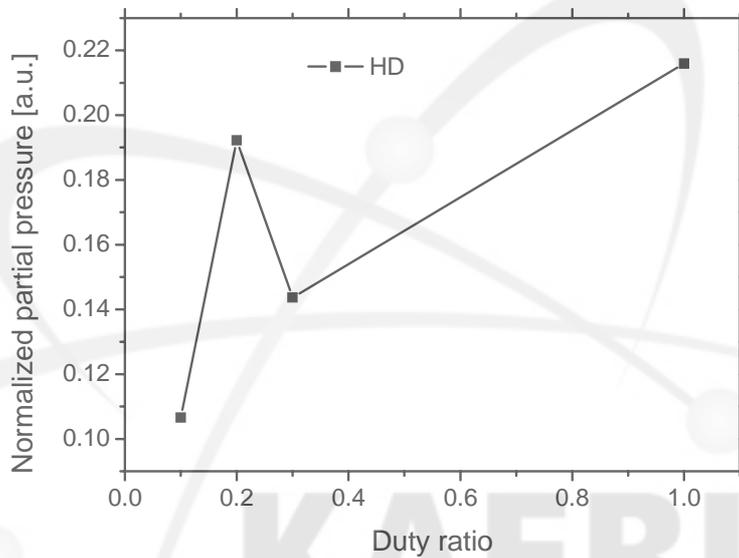


그림 28. 순수 He(800) 방전에서 duty ratio에 따른 HD 부분압

4. 요약 및 제안

초기 토카막 Start-up의 재현성과 신뢰성을 확보하기 위해 용기 벽면의 D_2 가스를 충분히 제거하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 D_2 제거를 위한 적정 운전 조건을 찾기 위하여 ICRF를 이용한 방전 세정(ICWC) 실험 연구를 수행하였다. 이를 위하여 He/ H_2 의 표준 가스로 하여 He/ H_2 의 유량과 RF pulse의 duty ratio에 따른 ICWC 효과를 실험하였으며 비교를 위한 ICWC 효율 계산은 플라즈마 밀도로 규격화한 HD의 증가량으로 평가하였다.

총 7세트의 실험이 진행 되었으며, 그 결과 수소의 유량을 증가시킴에 따라 HD의 형태로 중수소가 많이 제거될 수 있음을 확인하였다. 또한 duty ratio를 증가시킴에 따라 플라즈마 이온과 벽면의 중수소가 반응할 수 있는 시간이 길어짐에 따라 중수소가 많이 제거될 수 있음을 확인하였다.

최적화된 ICWC 실험을 위해서는 보다 체계적인 제어 실험이 필요할 것으로 생각된다. 매번의 ICWC shot 이전에 표면의 상태를 동일하게 만들기 위하여 충분한 시간 동안 He 방전세정과 D_2 또는 다른 불순물을 주입하기 위한 GDC를 수행해야 할 것으로 보인다. 한편 duty ratio의 경우 단순히 진공용기 벽면의 원자 간의 탈리 반응을 할 수 있는 시간이 많아져서 ICWC 효율이 증가한 것 이외에 duty ratio를 증가시킴에 따라 용기 벽면의 순간적인 표면 온도도 증가하여 ICWC 효율이 증가한 것으로 생각할 수도 있기 때문에 용기 표면의 온도 변화도 함께 모니터링 해야 할 것으로 생각된다.

마지막으로 본 연구에서는 D_2 가스의 제거 효율에 대한 운전 변수를 찾기 위한 실험을 진행하였는데 방전세정은 토카막 start-up 뿐만 아니라 정상상태에서 불순물의 양을 줄이는 것도 매우 중요하므로 앞으로 다른 불순물을 효과적으로 제거할 수 있는 운전 변수를 찾기 위한 방법론의 정립도 중요할 것으로 생각된다.

8절. 향후 실험

1. 차등배기 시스템의 잔류가스분석기에 의한 방전세정 분석

과제 계획에 의하면 2008년도에 비하여 베이킹시스템 보강, 벨로우즈라인의 교체를 통하여 차등배기계의 진공도를 향상하도록 요청하였다. 그러나 KSTAR 실험 일정 및 펌핑 포트에 설치한 타 시스템과의 인터페이스 문제 등으로 인하여 펌핑 덕트를 충분히 베이킹할 수 없었다. Orifice의 경우도 정량화가 가능하도록 초기에는 직경 100 um을 사용하여 진단하였으나 실제 계산 값과 맞지 않아 10배를 확장하였다. 그림 29는 KSTAR 진공용기(VV)와 펌핑 덕트의 차등 배기시스템(DP)에 설치되어있는 RGA를 이용하여 잔류 가스들을 측정된 것이다.(가동후 10여일 지난후) 펌핑 덕트에 설치되어 있는 RGA의 경우 질소와 산소의 분압이 약 4 : 1 로서 공기 누설이 있는 것으로 추정되었으나 나중에는 비율이 변화하였다. 추후 정밀한 측정이 필요하다.

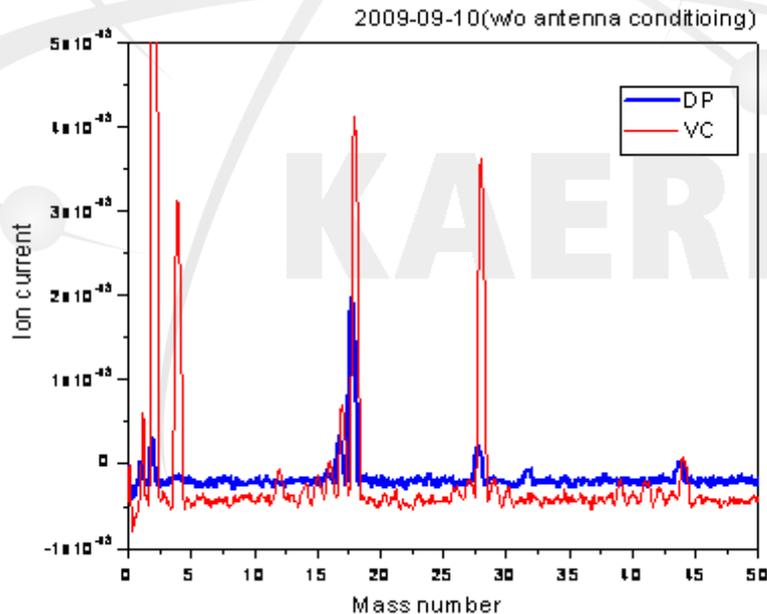


그림 29. 진공 챔버와 Differential Pumping을 이용한 진공배기관에서 RGA 측정값

2. 방전 세정시 수직자장 효과 분석

당초 예정되었던 실험은 PCS상에서 구현의 어려움으로 인하여 2010년도로 연기하

였다.

3. ICRF를 이용한 Boronization

당초 예정되었던 실험은 KSTAR 운전실험일정의 문제로 인하여 2010년도로 연기하였다.



제3장 결론

2009년도에는 토카막 start-up에 대한 재현성과 신뢰성을 확보할 수 있도록 효과적인 ICRF를 이용한 방전 세정(ICWC) 운전 조건 최적화 실험을 수행하였다. 먼저 본격적인 ICWC 및 ICRF를 이용한 토카막 플라즈마 가열 시험에 앞서 ICRF 운전 시스템의 변경이 선행되었다. 2009년 KSTAR 실험 campaign에서는 자기장의 세기가 1.5T에서 3T로 증가하여 이온 공명 주파수를 30MHz에서 45MHz로 수정해야 했기 때문이다. 운전 주파수가 상향 조정됨에 따라 공명루프의 길이와 임피던스 정합을 위한 전송선의 길이를 수정하였으며 그 결과 44.2MHz에서 안테나의 전류띠 2, 3번에 전류띠간 커플링에 의한 공명현상 없이 1 : 1의 전류비를 갖는 것으로 확인되어 운전 주파수를 44.2MHz로 확정하였다. 변경된 주파수에 대하여 송출기를 시험 운전하였고 그 결과 VSWR 1.37에서 647kW의 출력을 확인하였다. 방전 세정 중의 RF glow 플라즈마는 밀도가 토카막 플라즈마에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 진공 중 튜닝을 그대로 이용할 수도 있으나 VSWR을 보다 줄여 안정적인 송출기 운전을 하기위해 방전세정 플라즈마에 대하여 pulse-by pulse로 튜닝을 수행하였다. 그 결과 안정적인 송출기 운전을 하기에 충분할 정도로 VSWR을 낮출 수 있었다.

준비된 ICRF glow 플라즈마를 활용하여 방전세정에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 초기 토카막 start-up의 재현성과 신뢰성을 확보하기 위해 용기 벽면의 D_2 를 제거할 수 있는 적정 운전 조건을 찾기 위해 노력하였다. 이를 위하여 He/ H_2 의 표준 가스를 이용하여 He/ H_2 의 유량 비율과 RF pulse의 duty ratio에 따른 ICWC 효과를 실험하였으며 비교를 위한 ICWC 효율 계산은 플라즈마 밀도로 규격화한 HD의 증가량으로 평가하였다. 모두 7세트의 실험이 진행되었으며, 그 결과 수소의 유량을 증가시킴에 따라 HD의 형태로 중수소가 많이 제거될 수 있음을 확인하였다. 또한 duty ratio를 증가시킴에 따라 플라즈마 이온과 벽면의 중수소가 반응할 수 있는 시간이 길어짐에 따라 중수소가 많이 제거될 수 있음을 확인하였다. 최적화된 ICWC 실험을 위해서는 보다 체계적인 제어 실험이 필요할 것으로 생각된다. 예를 들면, 모든 ICWC shot 이전에 표면의 상태를 동일하게 만들기 위하여 매번 충분한 시간 동안 He 방전세정과 D_2 또는 다른 불순물을 주입하기 위한 GDC를 수행해야 할 것으로 보인다. 마지막으로 본 연구에서는 D_2 가스의 제거 효율에 대한 운전 변수를 찾기 위한 실험을 진행하였는데 방전세정은 토카막 start-up 뿐만 아니라 정상상태에서 불순물의 양을 줄이는 것도 매우 중요하므로 앞으로 다른 불순물을 효과적으로 제거할 수 있는 운전 변수를 찾기 위한 방법론도 연구되어야 할 것으로 생각된다.

제4장 참고문헌

- [1] J. Winter, Plasma Phys. Control. Fusion **38** (1996) 1503-1542
- [2] R. Pitts et al., ITER Urgent task in 2009-2010
- [3] G. Sergienko et al., Journal of Nuclear Materials 390-391 (2009) 979-982



서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식							
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/CR-349/2009							
제목 / 부제		ICRF를 이용한 KSTAR 진공내벽 방전세정					
연구책임자 및 부서명		곽중구 (핵융합공학기술개발부)					
연구자 및 부서명		왕선정, 김성규, 배영덕, 윤재성, 김선호 (핵융합공학기술개발부)					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2009.12		
페이지	43 p.	도표	있음(○), 없음()	크기	21×29.7 Cm.		
참고사항							
공개여부	공개(○), 비공개()		보고서종류	수탁보고서			
비밀여부	대외비(), ___ 급비밀						
연구위탁기관	국가핵융합연구소		계약번호				
초록 (15-20줄내외)		<p>2009년도에는 토카막 start-up에 대한 재현성과 신뢰성을 확보할 수 있도록 효과적인 ICRF를 이용한 방전 세정(ICWC) 운전 조건 최적화 실험을 수행하였다. 먼저 본격적인 ICWC 및 ICRF를 이용한 토카막 플라즈마 가열 시험에 앞서 ICRF 운전 시스템의 변경이 선행되었다. 운전 주파수가 상향 조정됨에 따라 공명루프의 길이와 임피던스 정합을 위한 전송선의 길이를 수정하였으며 운전 주파수를 44.2MHz로 확정하였다. 변경된 주파수에 대하여 송출기를 시험 운전하였고 그 결과 VSWR 1.37에서 647kW의 출력을 확인하였다. 방전 세정 중의 RF glow 플라즈마는 밀도가 토카막 플라즈마에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 진공 중 튜닝을 그대로 이용할 수도 있으나 VSWR을 보다 줄여 안정적인 송출기 운전을 하기위해 방전세정 플라즈마에 대하여 pulse-by-pulse로 튜닝을 수행하여 안정적인 송출기 운전을 하기에 충분할 정도로 VSWR을 낮추었다. 준비된 ICRF glow 플라즈마를 활용하여 방전세정에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 초기 토카막 start-up의 재현성과 신뢰성을 확보하기 위해 용기 벽면의 D₂를 제거할 수 있는 적정 운전 조건을 찾기 위해 노력하였다. 이를 위하여 He/H₂의 표준 가스를 이용하여 He/H₂의 유량 비율과 RF pulse의 duty ratio에 따른 ICWC 효과를 실험하였으며 비교를 위한 ICWC 효율 계산은 플라즈마 밀도로 규격화한 HD의 증가량으로 평가하였다. 모두 7세트의 실험이 진행되었으며, 그 결과 수소의 유량을 증가시키기에 따라 HD의 형태로 중수소가 많이 제거될 수 있음을 확인하였다. 또한 duty ratio를 증가시키기에 따라 플라즈마 이온과 벽면의 중수소가 반응할 수 있는 시간이 길어짐에 따라 중수소가 많이 제거될 수 있음을 확인하였다.</p>					
주제명 키워드 (10단어내외)		KSTAR, 방전세정, ICRF					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/CR-349/2009					
Title / Subtitle		Discharge Cleaning on KSTAR Vacuum Wall using ICRF			
Project Manager and Department		Jong-Gu Kwak (Nuclear Fusion Research Department)			
Researcher and Department		Son-Jong Wang, Sung-Kyew Kim, Young-Dug Bae Jae-Sung Yoon, Sun-Ho Kim (Nuclear Fusion Research Department)			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2009.12
Page	43 p.	Ill. & Tab.	Yes(<input type="radio"/>), No (<input type="radio"/>)	Size	21×29.7 Cm.
Note					
Open	Open(<input type="radio"/>), Closed(<input type="radio"/>)		Report Type	CR	
Classified	Restricted(<input type="checkbox"/>), ___Class Document				
Sponsoring Org.	National Fusion Research Institute		Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)					
<p>In 2009 KSTAR experiment campaign, optimization of ICWC(ICRF assisted discharge Wall Cleaning) is carried out to secure reproducibility and reliability of tokamak start-up. ICRF system is modified first before experiment campaign. As operation toroidal magnetic field strength is increased from 1.5T to 3T, the length of resonance loop and power transmission is modified and the driving frequency is increased to 44.2MHz. At the changed operation frequency, RF transmitter is tested and as a result, 647kW RF power is identified at VSWR of 1.37. The density of RF glow plasma for ICWC is relatively lower than that of tokamak plasma so that the vacuum tuning can be used for ICWC glow plasma as well. However, the VSWR is reduced enough for the reliable RF transmitter operation by pulse-by-pulse tuning. ICWC is carried out with modified ICRF system. In this study, a series of effort is tried to find optimal condition which enables to remove effectively the D₂ gas embedded in the tokamak wall. With He/H₂ working gas, the effect of the gas mixing rate and pulse duty ratio on ICWC are investigated. And the ICWC efficiency is evaluated with the increased quantity of HD molecule measured by RGA. All 7 sets of experiments are performed. As a result, It is identified that deuterium can be removed effectively due to the increase of reaction rate by the increased hydrogen molecule. It is also confirmed that the HD can be removed more by the increased reaction time between the hydrogen ion and deuterium adsorbed in the tokamak wall.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		KSTAR, ICRF assisted Wall Cleaning, ICRF			