

Reactor Experiment for Neutrino Oscillation

Seon-Hee Seo Stockholm Univ.



OKC Seminar Stockholm Univ. Feb. 22, 2011

Outline

Short Introduction

Experimental Goals of the RENO Experiment

- Systematic & Statistical Uncertainties
- Expected θ_{13} Sensitivity

Overview of the RENO Experiment

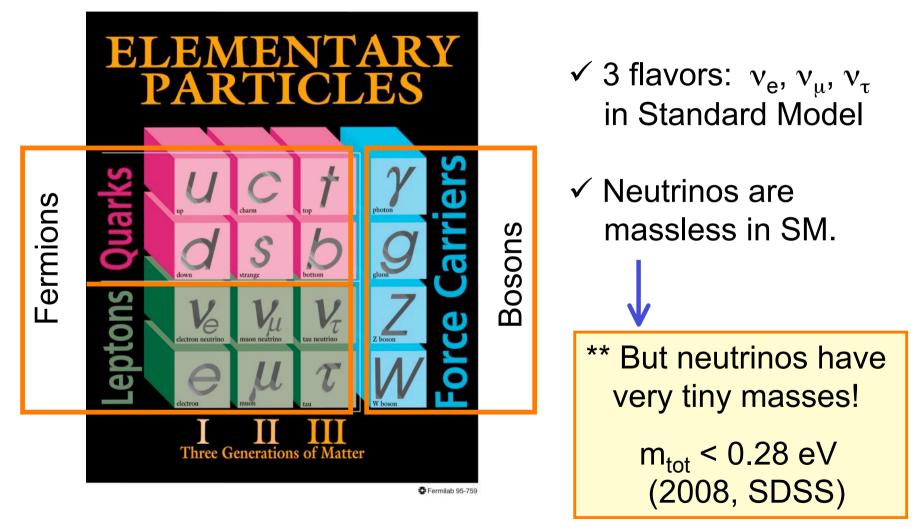
- Experimental Setup
- YongGwang Power Plant
- Schedule
- □ Construction Status of the RENO Experiment
 - Tunnel
 - Detector
 - DAQ & Data Analysis Tools

Brief History of Neutrinos

- 1930: Pauli postulated neutrino to explain β decay problem (3body kin. 2body)
- 1933: Fermi baptized the neutrino in his weak-interaction theory
- <u>**1956</u>**: first discovery of neutrino (\overline{v}_e) by Reines & Cowan from reactor</u>
- 1957: neutrinos are left-handed by Goldhaber et al.
- <u>**1962</u>**: discovery of v_{μ} by Lederman et al. (Brookhaven Lab)</u>
- 1974: discovery of neutral currents due to neutrinos
- 1977: tau lepton discovery by Perl et al. (SLAC)
- 1998: **atmospheric** neutrino oscillation observed by Super-K (confirmed by K2K & MINOS) **2000**: v_{τ} discovery by DONUT (Fermilab)
- 2002: **solar** neutrino oscillation observed by SNO (confirmed by KamLAND)

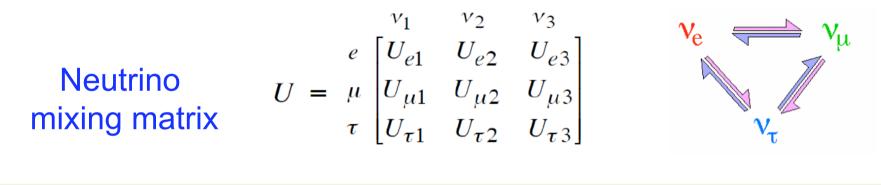
What NEXT...?

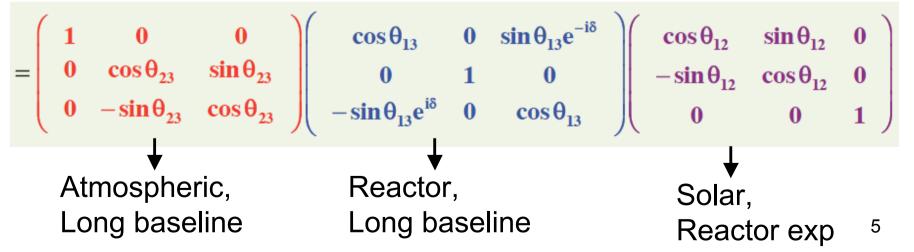
Standard Model



Neutrino Oscillation

 $\begin{array}{ll} (\nu_{e},\nu_{\mu},\nu_{\tau}) & (\nu_{1},\nu_{2},\nu_{3}) \\ \hline \textbf{Flavor eigen-state} & \neq & \textbf{mass eigen-state} \\ \text{creation/detection} & & \text{travel (oscillation)} \end{array}$





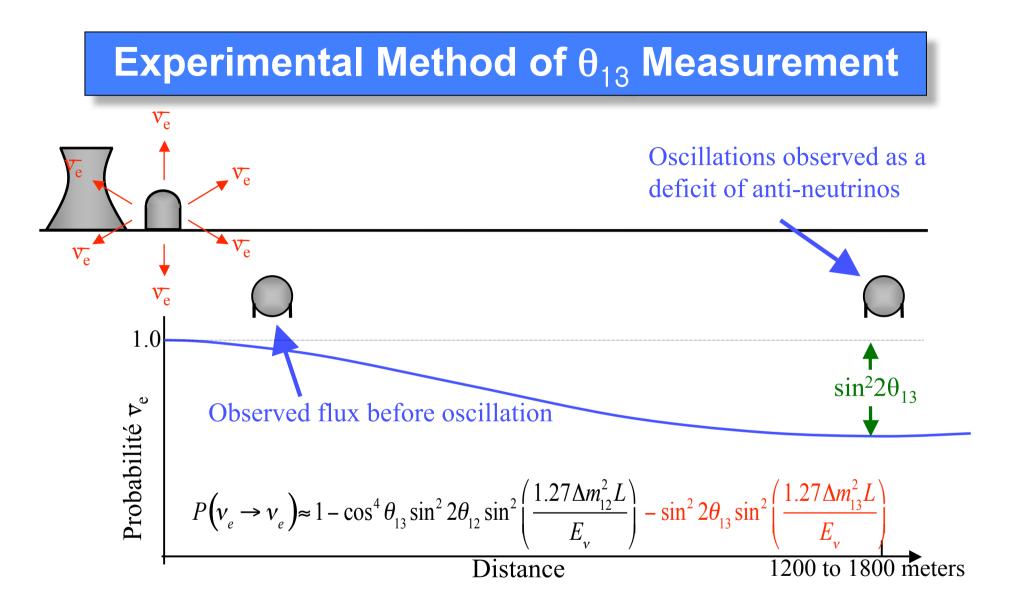
Neutrino Oscillation Parameters

$$\Delta m_{12}^2 \sim +7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \quad \theta_{12} \sim 34^{\circ}$$

$$\Delta m_{23}^2 \sim \pm 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \quad \theta_{23} \sim [38^{\circ} \sim 52^{\circ}]$$

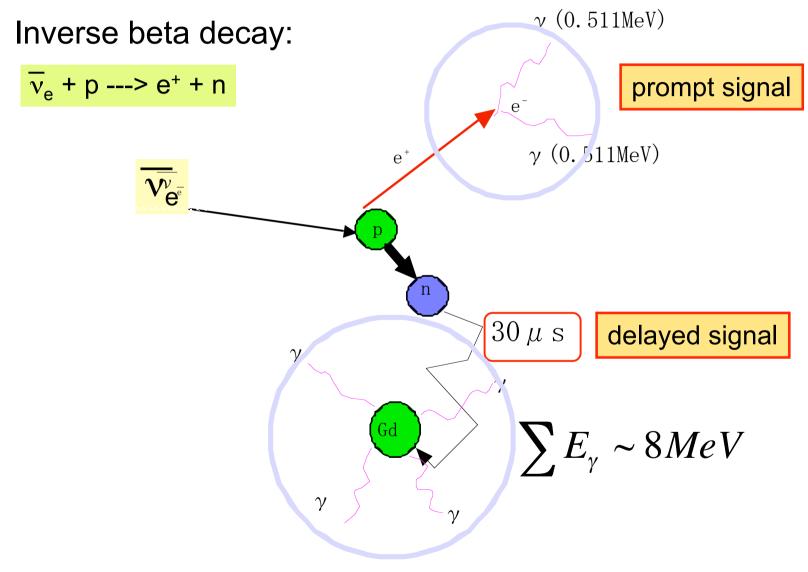
$$\theta_{13} < 10^{\circ} \leftarrow \text{Global fit}_{arXiv:1003.5800}$$
based on Chooz exp. (2003)

✓ RENO is aiming for a precise measurement of θ_{13} . (competing exp.: Double-Chooz, Daya Bay)

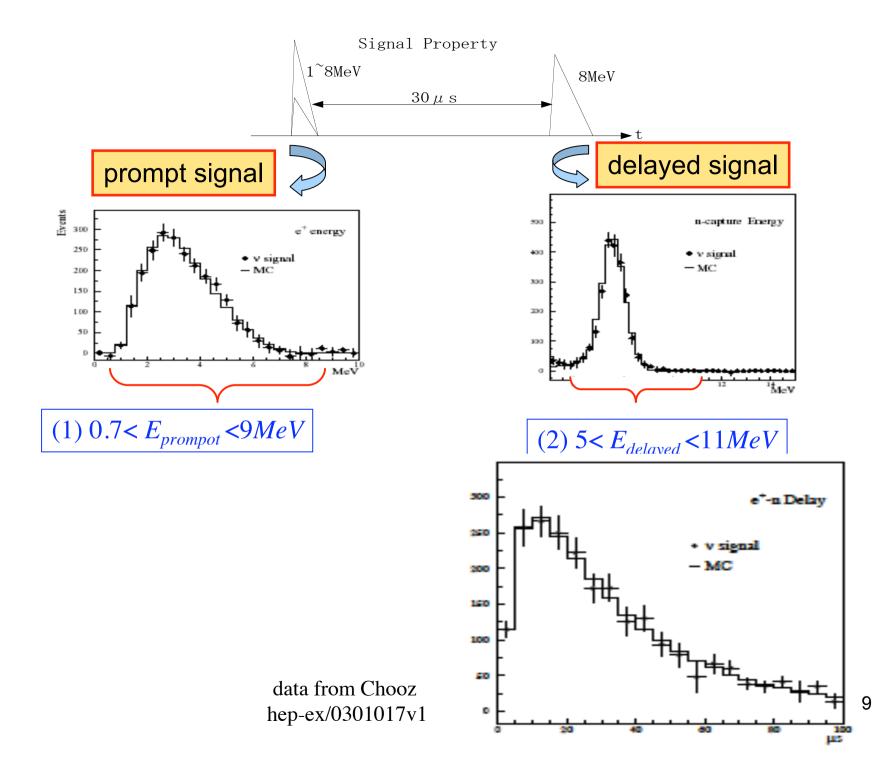


□ Find disappearance of $\overline{v_e}$ fluxes due to neutrino oscillation as a function of energy using multiple, identical detectors to reduce the systematic errors in 1% level. 7

Detection of Reactor Neutrinos

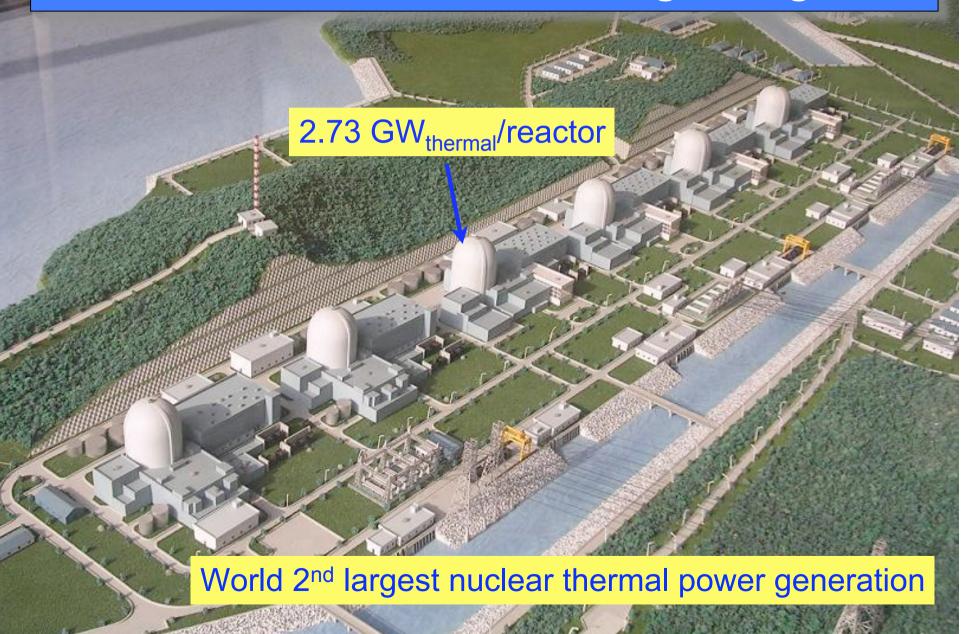


8





6 Nuclear Reactors in YongGwang



Expected Number of Neutrino Events at RENO

- 2.73 GW_{th} per reactor × 6 reactors
- 1.21×10^{30} free protons per target (16 tons) \times 2 targets

Near: 1,280/day, 468,000/year
Far: 114/day, 41,600/year

3 years of data taking with 70% efficiency

Near : $9.83 \times 10^5 \approx 10^6$ (0.1% error) Far : $8.74 \times 10^4 \approx 10^5$ (0.3% error)

Expected Number of BG Events at RENO

source	Detected as	Near Det.	Far Det.	
Radioactive Environment (⁴⁰ K, ⁶⁰ Co, ²³² Th, ²³⁸ U)	Single γ	~30 Hz	~30 Hz	easily removable
lsotopes induced by cosmic μ (⁸ He, ⁹ Li)	correlated n	2.8 / day	0.7 / day	mimic signal
Fast n from cosmic μ	correlated n	3.0 / day	1.0 / day	
Total		~6 / day (< 0.5%)	~2 / day —	Removable down to << 0.5%
		✓ No problem		13

Expected Systematic Uncertainty

Syst	CHOOZ (%)	RENO (%)	
Reactor related	Reactor antineutrino flux and cross section	1.9	< 0.1
absolute normalization	Reactor power	0.7	0.2
	Energy released per fission	0.6	< 0.1
Number of protons	H/C ratio	0.8	0.2
in target	Target mass	0.3	< 0.1
Detector Efficiency	Positron energy	0.8	0.1
	Positron geode distance	0.1	0.0
	Neutron capture (H/Gd ratio)	1.0	< 0.1
	Capture energy containment	0.4	0.1
	Neutron geode distance	0.1	0.0
	Neutron delay	0.4	0.1
	Positron-neutron distance	0.3	0.0
	Neutron multiplicity	0.5	0.05
	2.7	< 0.5	

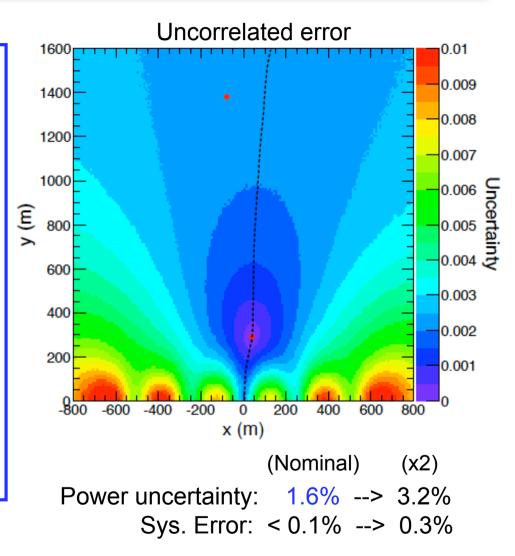
6 Reactor Neutrino Flux Uncertainty

Uncorrelated error:

- -- from individual reactor thermal power output error
- -- reduced by ratio, # v (FD) / # v (ND)

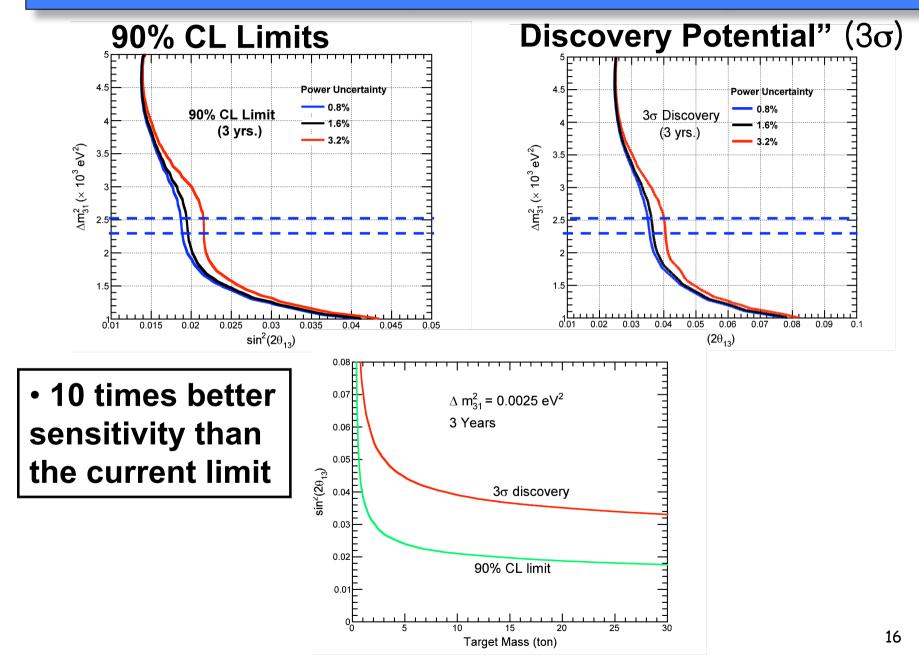
Correlated error:

- -- from normalization of total neutrino flux
- -- Using data from one reactor OFF (every 3 month) for 1 month, the flux difference can be measured in the ratio and reduced.



(** This sys. error is already included in the previous table.)

RENO Expected Sensitivity



Comparison of Reactor Neutrino Experiments

Experiments	Location	Thermal Power (GW)	Distances Near/Far (m)	Depth Near/Far (mwe)	Target Mass (tons)	Cost (US \$)	# of people
Double-Chooz	France	8.7	410/1050	115/300	10/10	?	> 160
RENO	Korea	17.3	290/1380	120/450	16/16	~10M	40
Daya Bay	China	11.6	360(500)/1985(1613)	260/910	40×2/80	?	> 230

- ✓ **Double-Chooz** is expected to complete construction in **2012**. $sin^2(2\theta_{13}) > 0.03$
- ✓ **RENO** will finish its construction by Mar. 2011.
- 1. sin²(2θ₁₃) > 0.02
- ✓ Daya Bay: expected completion is at the end of 2012.

 $sin^{2}(2\theta_{13}) > 0.01$

RENO Collaboration

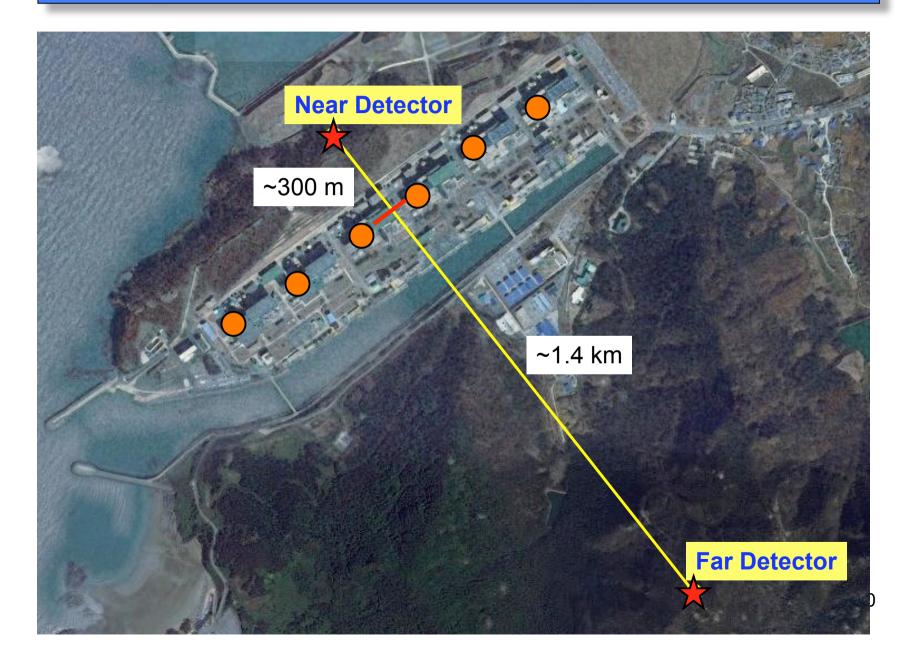


(13 institutions and 40 physicists) □ Chonbuk National University (전북대학교) □ Chonnam National University (전남대학교) □ Chung-Ang University (중앙대학교) □ Dongshin University (동신대학교) □ Gyeongsang National University (경상대학교) □ Kyungpook National University (경북대학교) □ Pusan National University (부산대학교) □ Sejong University (세종대학교) □ Seokang Information University (서강정보대학교) □ Seokyeong University (서경대학교) □ Seoul National University (서울대학교) □ Sungkyunkwan University (성균관대학교) California State University Domingez Hills, USA +++ http://neutrino.snu.ac.kr/RENO

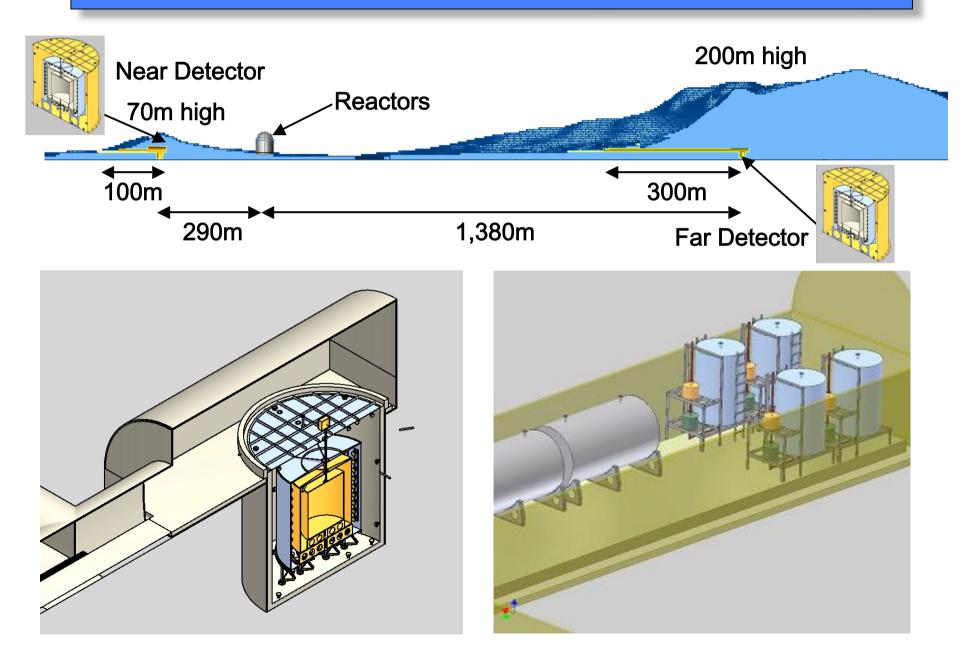
RENO Experimental Setup

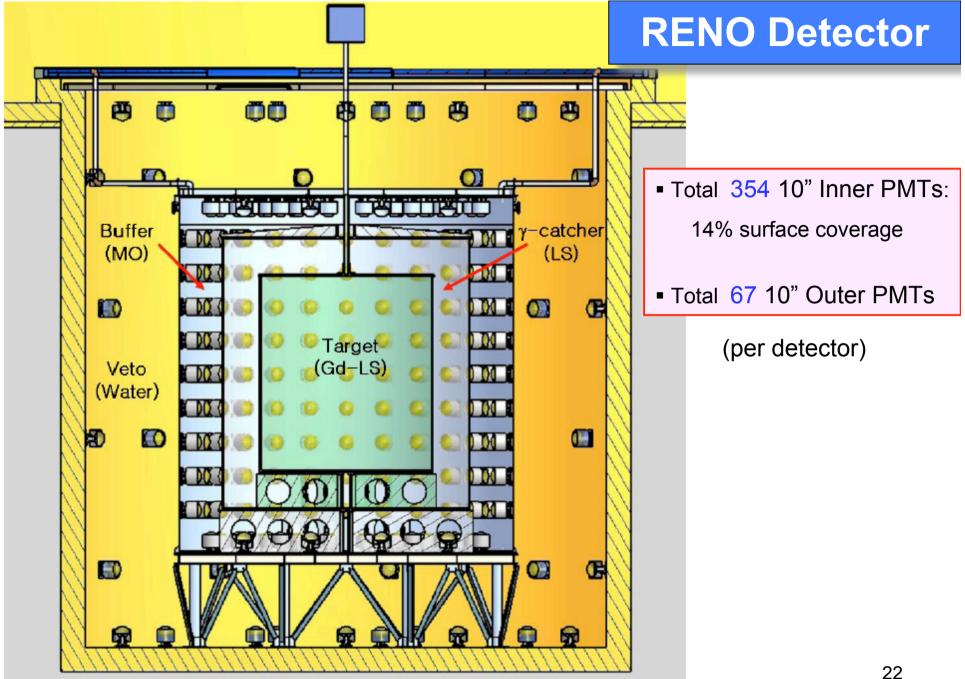


Google Satellite View of Experimental Site



Schematic View of Underground Facility



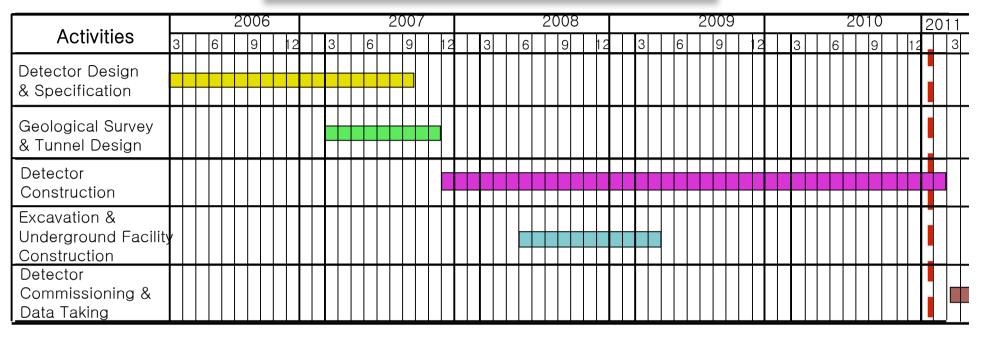


RENO Detector (cont'd)

RENO consists of 4 different purpose/size symmetric & coaxial cylinders.

	Inner Diameter (cm)	Inner Height (cm)	Container Material	Filled with	Mass (ton)
Target vessel	280	320	Acryl	Gd (0.1%) + LS	16.5
Gamma catcher	400	440	Acryl	LS	30.0
Buffer tank	540	580	Stainless steel	Mineral oil	64.4
Veto tank	840	880	concrete	Water	352.6





□ Tunnel facility, detector structure & buffer steel tanks are completed.

□ June 2010 : Acrylic containers are installed.

Aug. 2010 : PMT test (completed).

□ Aug. ~ Dec. 2010 : Installation of PMTs and veto tyvek (done).

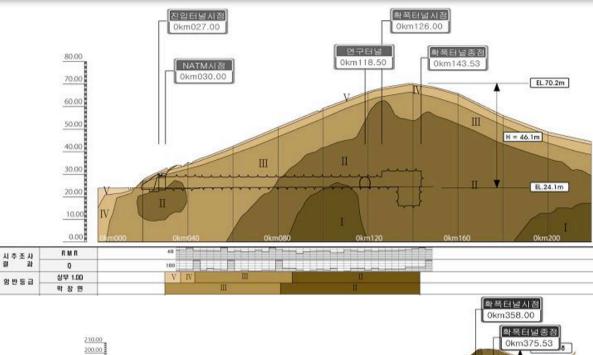
□ Jan. 2011 : Installation of DAQ & HV (70%) and detector closing (done).

□ Feb. 2011 : Installation of liquid handling system (done), making liquids (on-going)

24

□ Mar. 2011 : Start data taking, filling liquids

Rock Quality Map

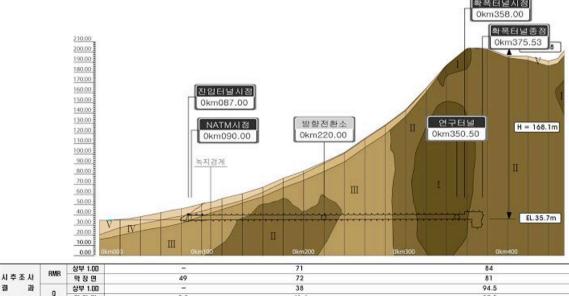


(2007.3~2007.8)

- Near detector site:
- tunnel length : 110m
- overburden

height: 46.1m

Rock quality was good to make tunnels.



41.4

87.5

2.5

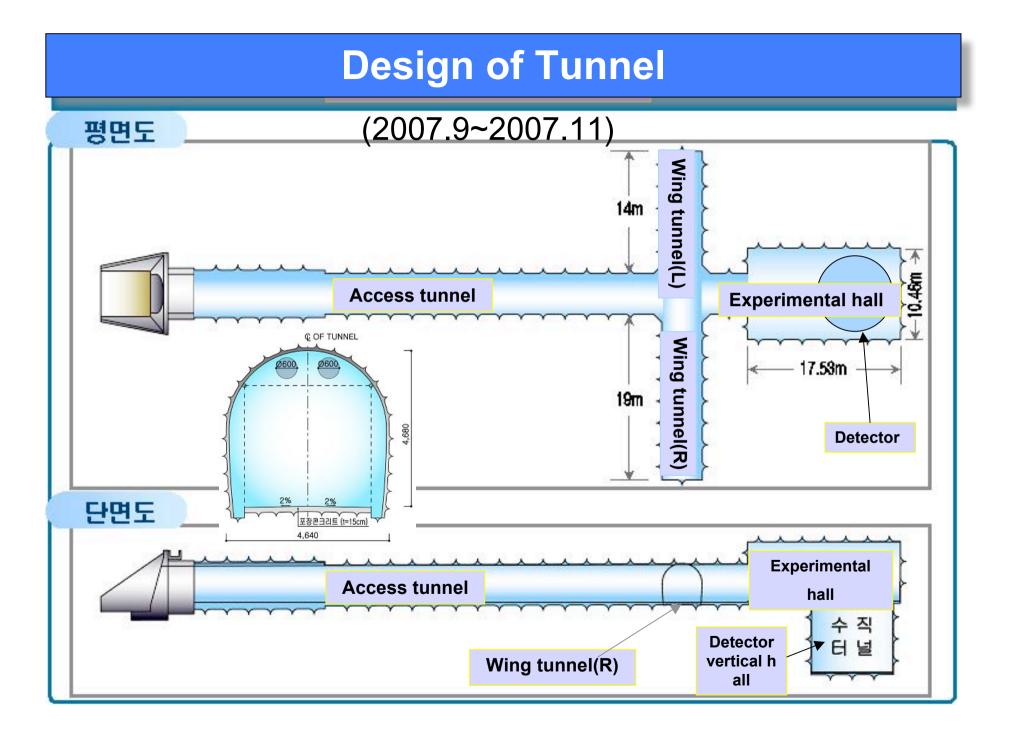
걸

암 반 등 급

막장면 상부 1.00

막장민

- Far detector site:
- tunnel length : 272m
- overburden
 - height : 168.1m



Tunnel Construction for Underground Facility

□ Approval from government regulation ('08. 01/05)

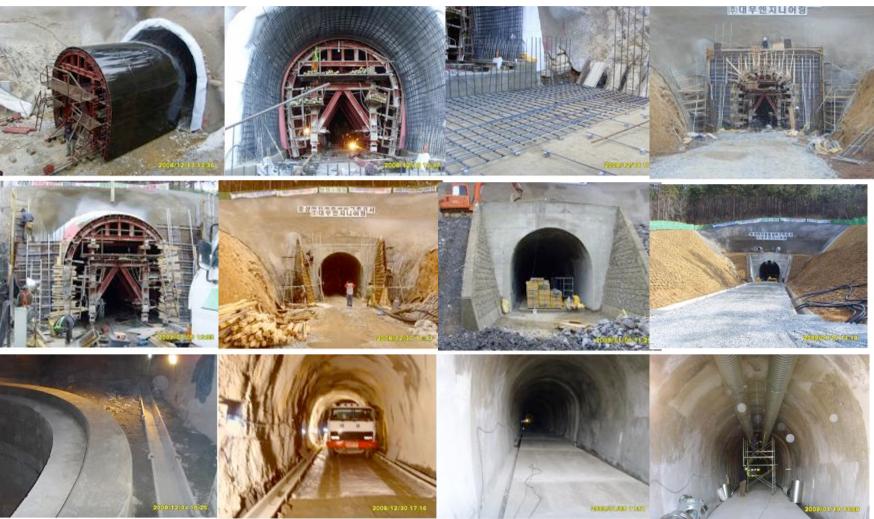
- □ Cleared local government regulations ('08. 01~'08. 06)
- □ Preparation for tunnel excavation ('08. 07)



Tunnel Construction

(2008.6~2008.12)

by Daewoo Eng. Co. Korea



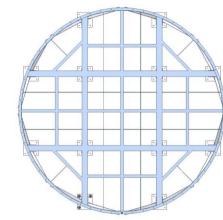
Near & far tunnels are completed

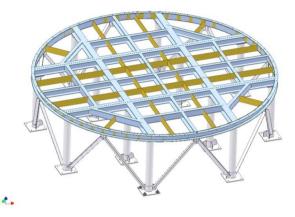
(2008.6~2009.3)

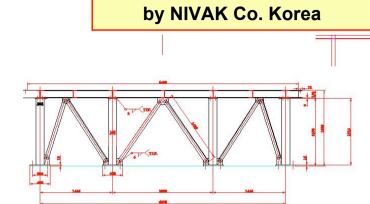
by Daewoo Eng. Co. Korea



Vertical detector halls & steel structure are ready (2008. 12~2009. 06)









Underground Peripheral Facility (2009. 7~12)

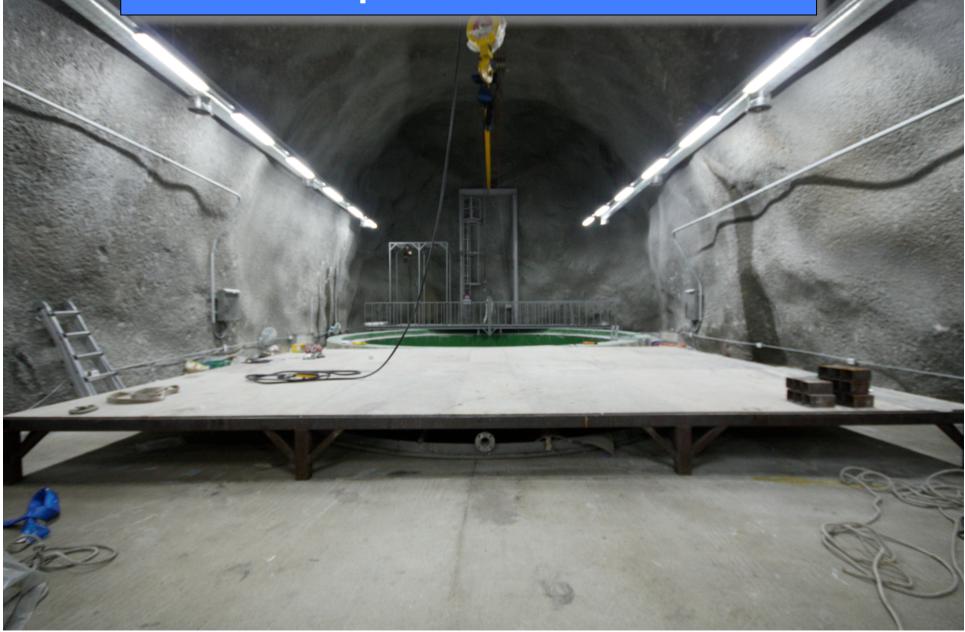
□ Electric power and ground system



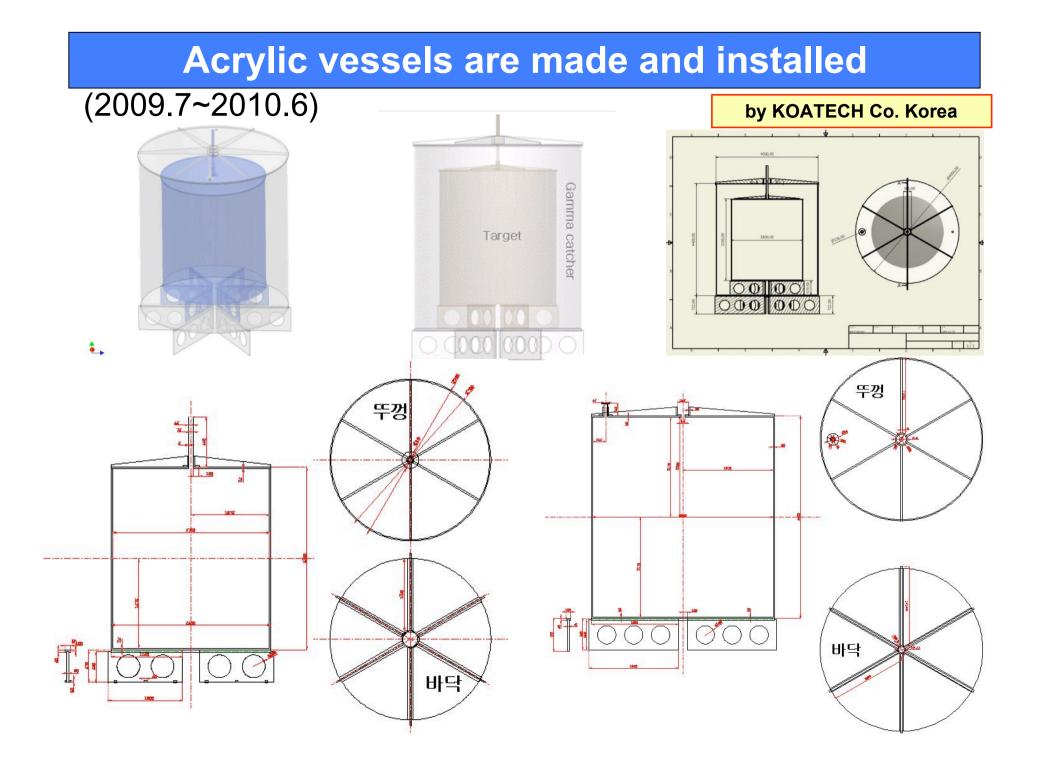
□ Internet cable and mobile telephone network



Experimental Hall



















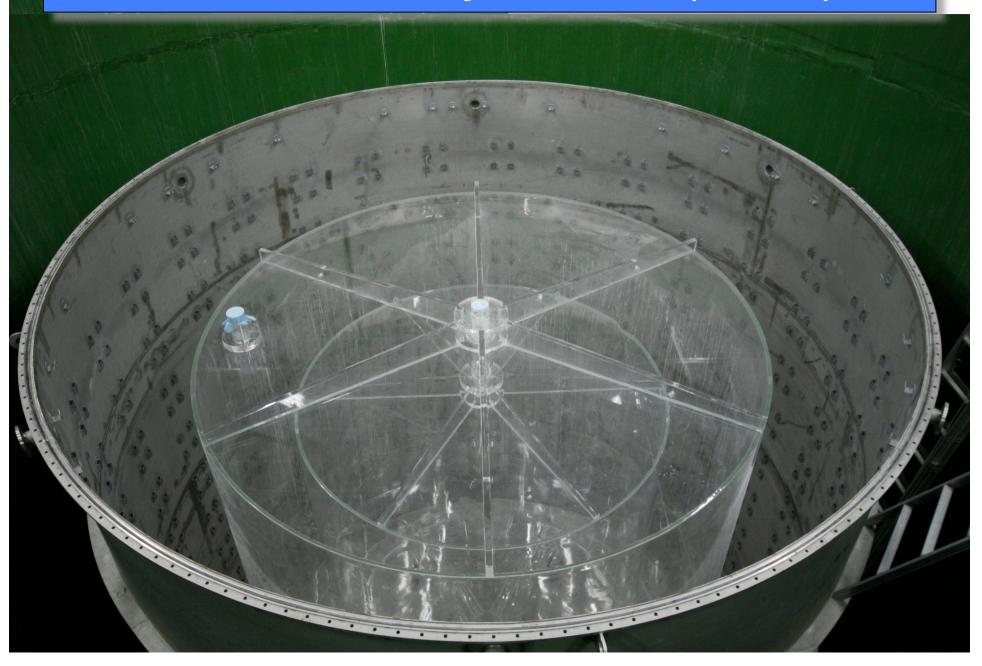




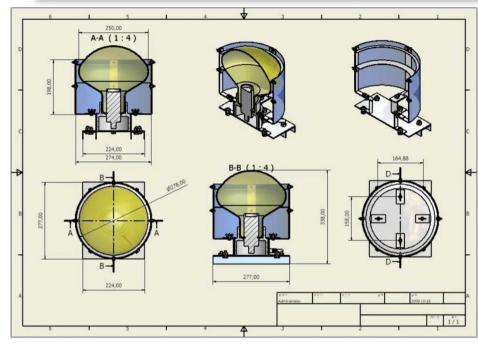


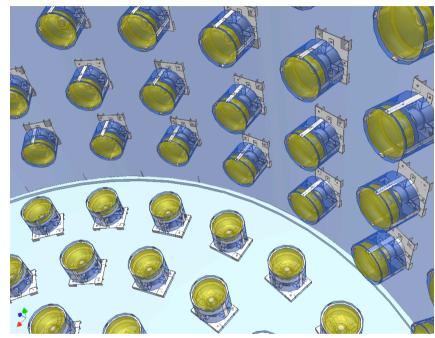


Installation of Acrylic Vessels (2010. 6)

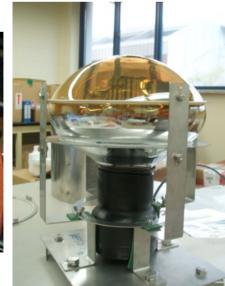


PMT Holder (2009. 10~12) and Mounting (2010. 8)



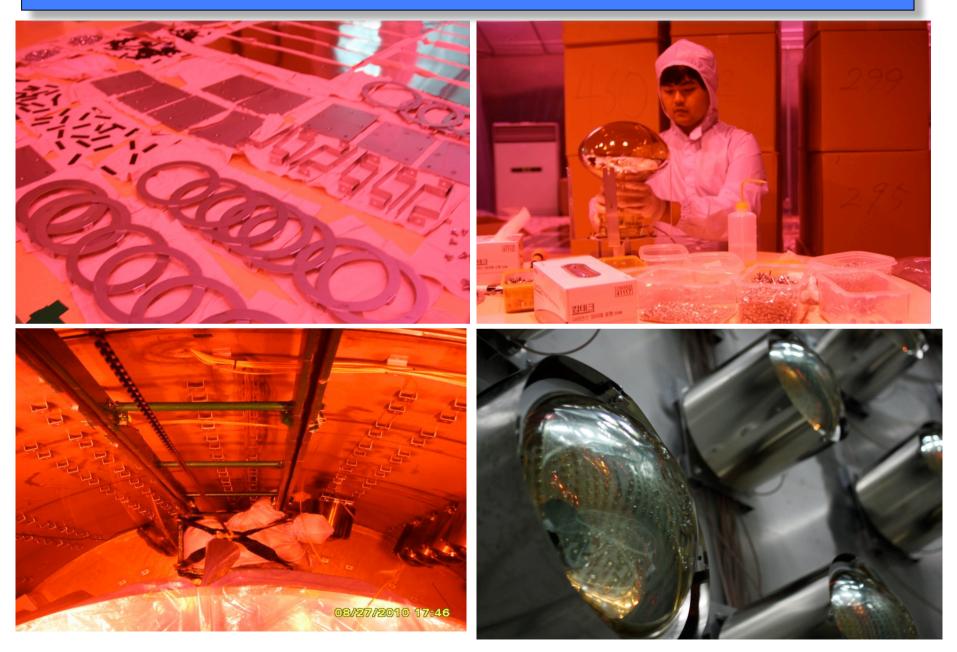








PMT Assembling (2010. 8~10)



1st & Bottom PMT Mounting (2010. 8. 17)









PMT Mounting (2010. 8 ~ 2011. 1)









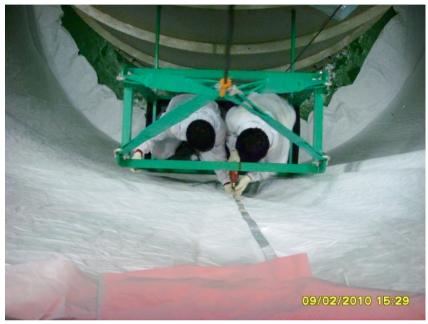
Near Detector: Mounted PMTs (2010. 8)



Far Detector: Mounting PMTs (2011. 1)



Veto Tyvek and PMTs (2010. 10)









Leak Test of Acrylic Vessels (2010. 10~11)



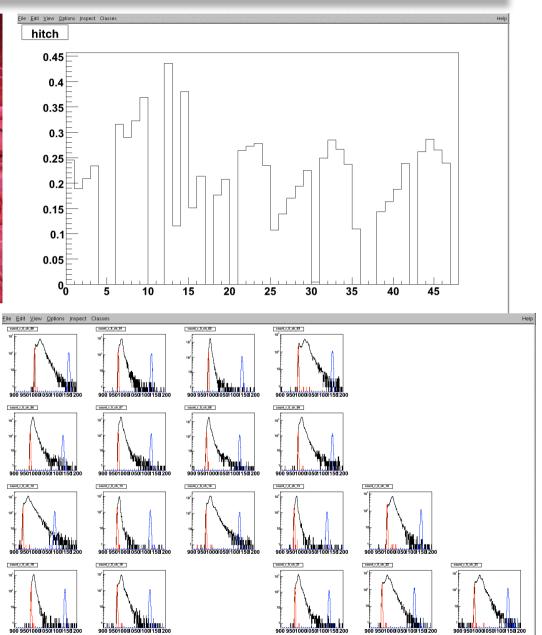




PMT Signal Check (2010. 10~12)







Tyvek Installation (2011. 1.)



ND/FD: Chimney, Tybek, Buffer Lids (2011. 1)







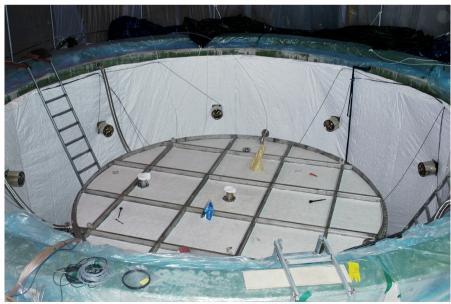


Near Detector: Installing Tubes (2011. 1)







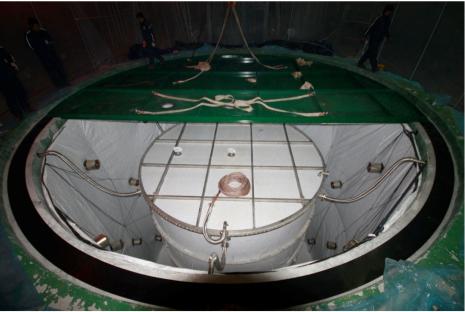


Near Detector: Installing Tubes (2011. 1)

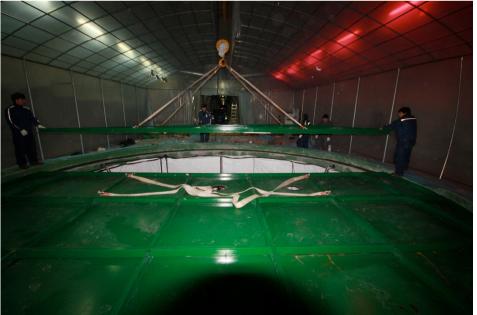


Near Detector: Closing Veto Lid (2011. 1)









Closing Near Detector (2011.1)



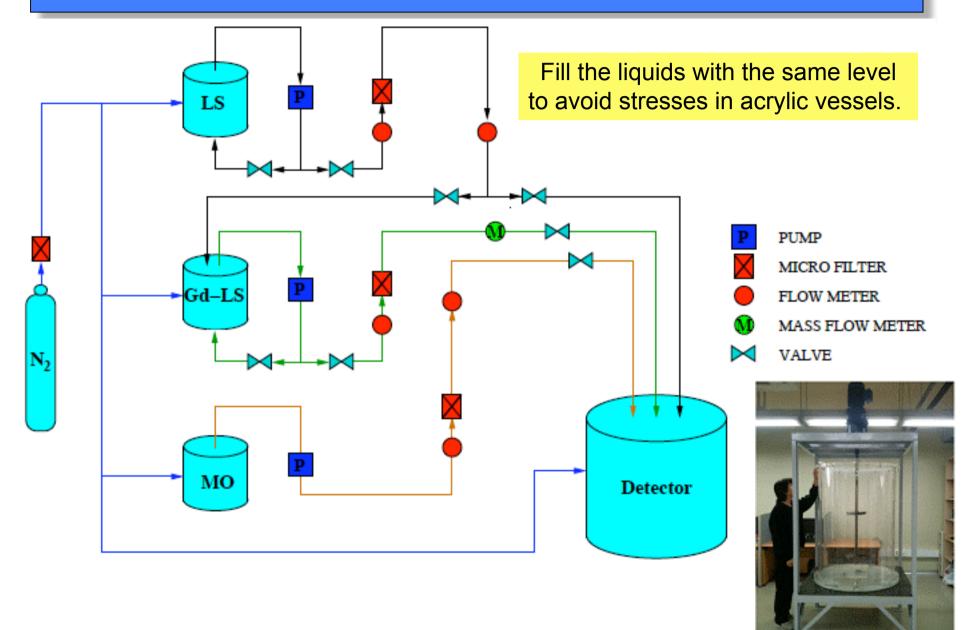
✓ Near Detector is finished (Jan. 21, 2011).

Closing Far Detector (2011. 1)



✓ Far Detector is finished (Jan. 24, 2011).

Liquid Handling System (2010. 10 ~2011. 2)



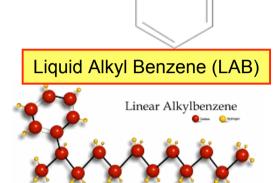
Gd Loaded Liquid Scintillator

$C_nH_{2n+1}-C_6H_5$ (n=10~14)

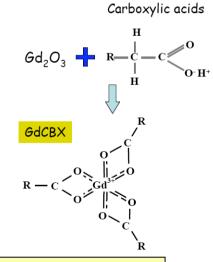
 $C_{12}H_{25}$

□ Recipe of Liquid Scintillator

Aromatic Solvent & Flour	WLS	Gd-compound
LAB	PPO + Bis-MSB	0.1% Gd+TMHA (trimethylhexanoic acid)



- High Light Yield : unlike Mineral oil(MO)
- replace MO and even Pseudocume(PC)
- Good transparency (better than PC)
- High Flash point : 147°C (PC : 48°C)
- Environmentally friendly (PC : toxic)
- Components well known (MO : not well known)
- Domestically available: Isu Chemical Ltd.



□ 0.1% Gd compounds with CBX (Carboxylic acids; R-COOH)

- CBX : TMHA (trimethylhexanoic acid)

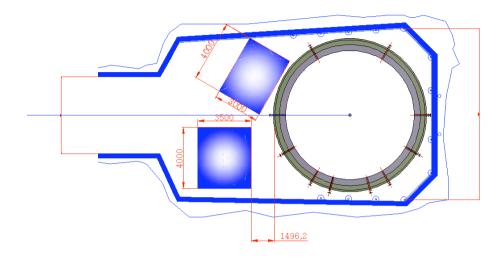
Trailer Research Facility & Guest Room (2009. 11~2010. 2)

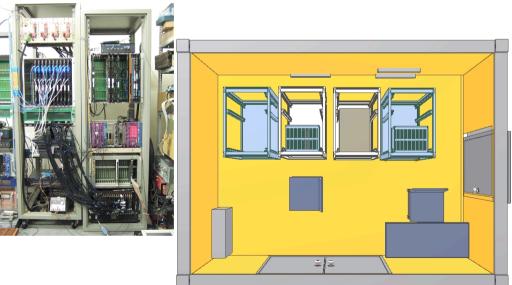


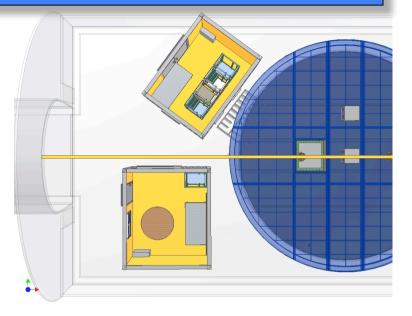


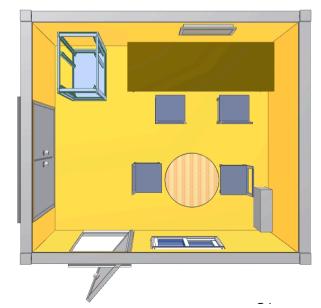


Design of Electronics Hut & Control Room (2010. 11)





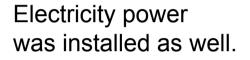




\$

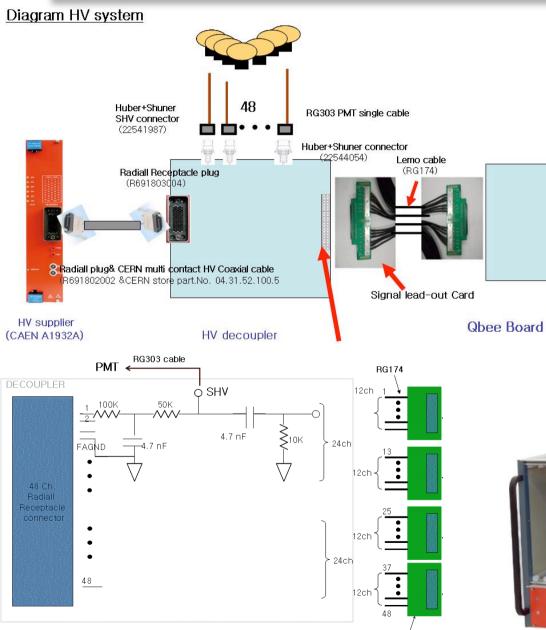
•

Installing Electronics Hut & Control Room (2011. 1)





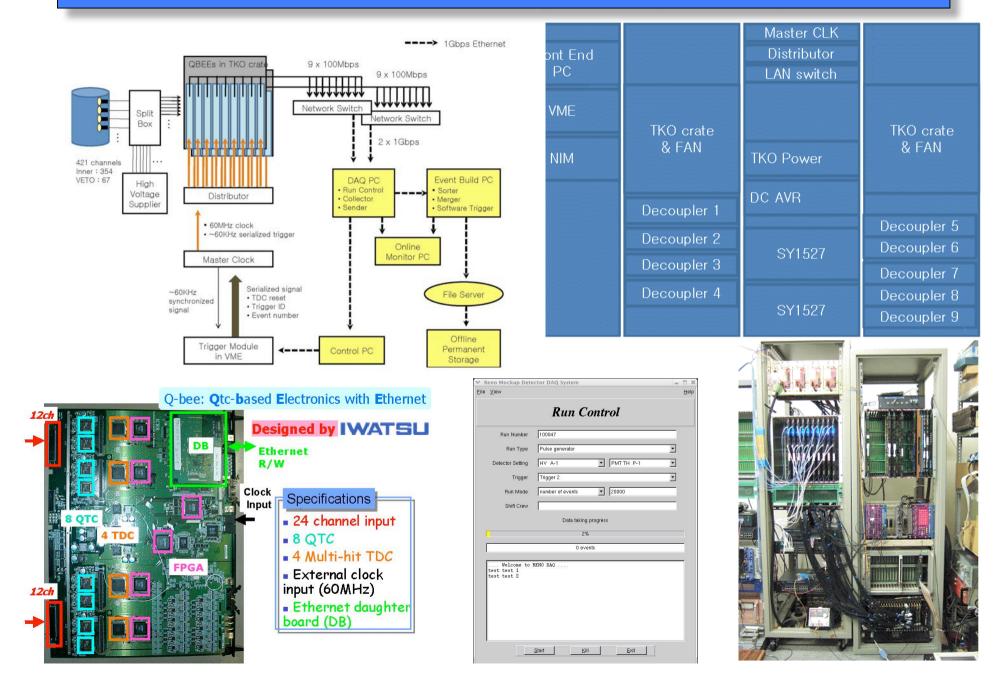
HV Supply System (2010. 9)



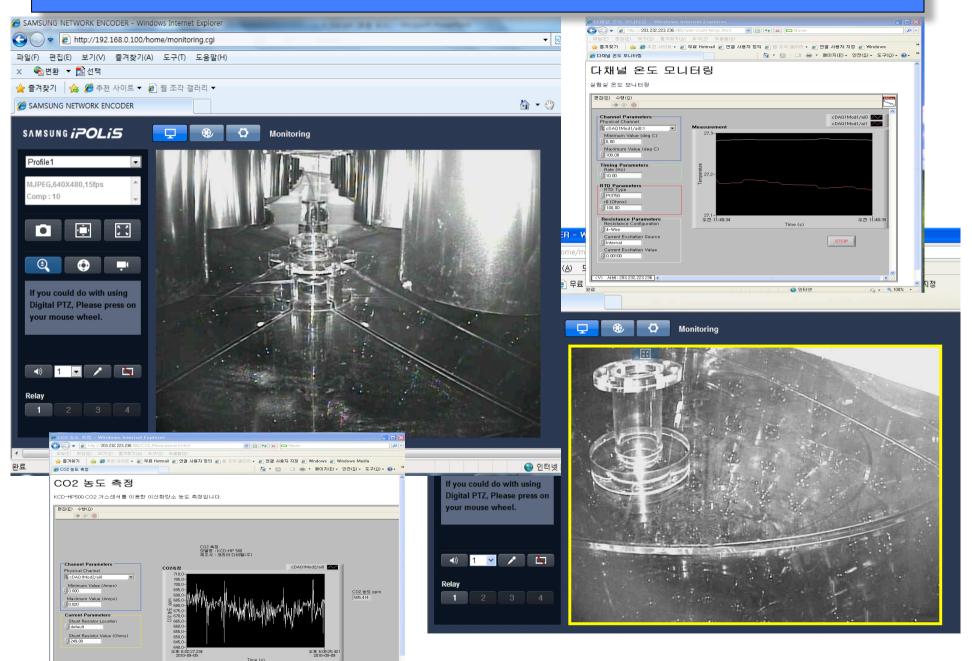
SIGNAL LEAD-OUT CARD

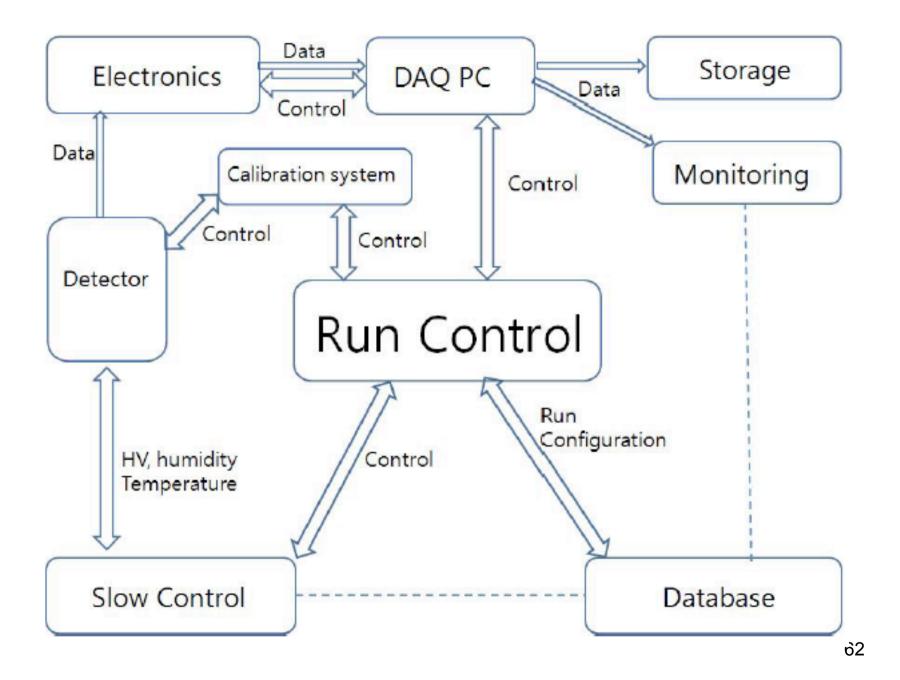


DAQ Electronics System (2010.9)



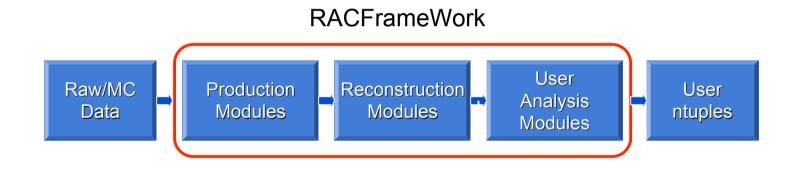
Detector Monitoring System (2010. 12 ~ 2011. 1)



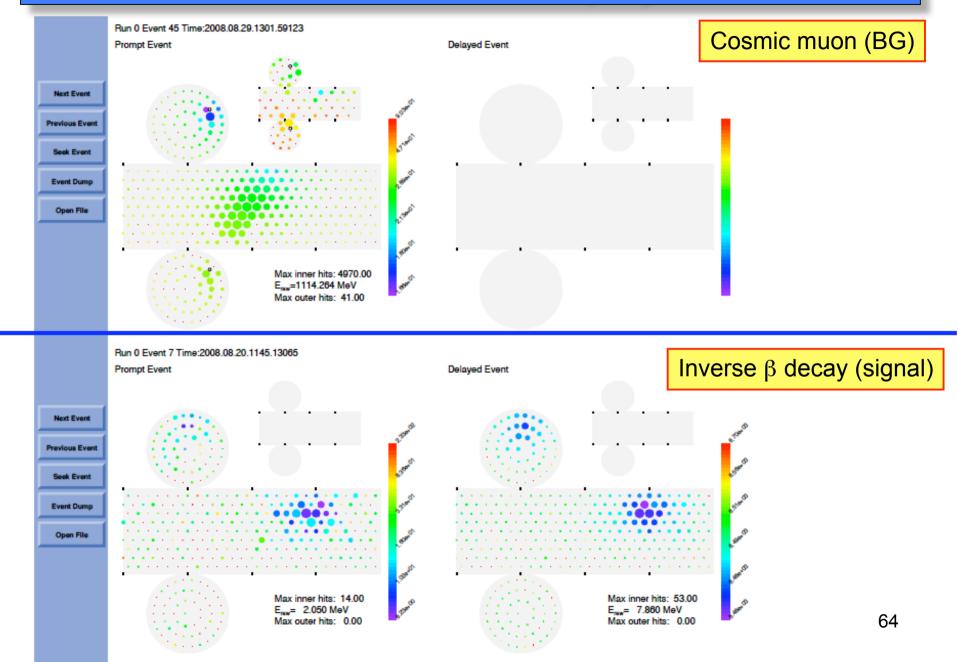


RENO Analysis Code

RENO Analysis Control



RENO Event Display



Overview of RENO Preparation

Prototype detector: Oct. 2006
 -- size: 1/75 (no buffer, no veto)
 -- PMT study, liquid scintillator study



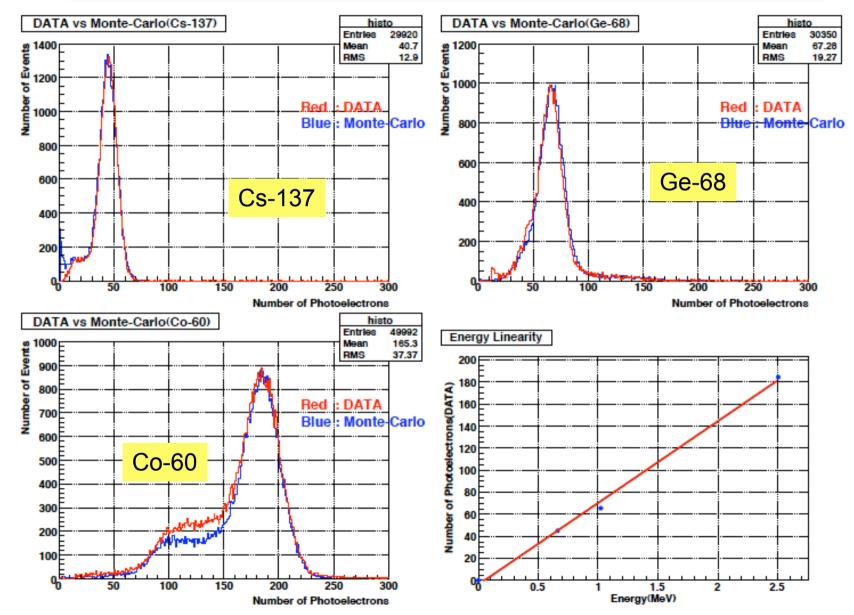


- ✓ Mockup detector:
 - -- Nov. 2008
 - -- size: 1/15 (no veto)
 - -- mechanical study, DAQ test, mini data taking

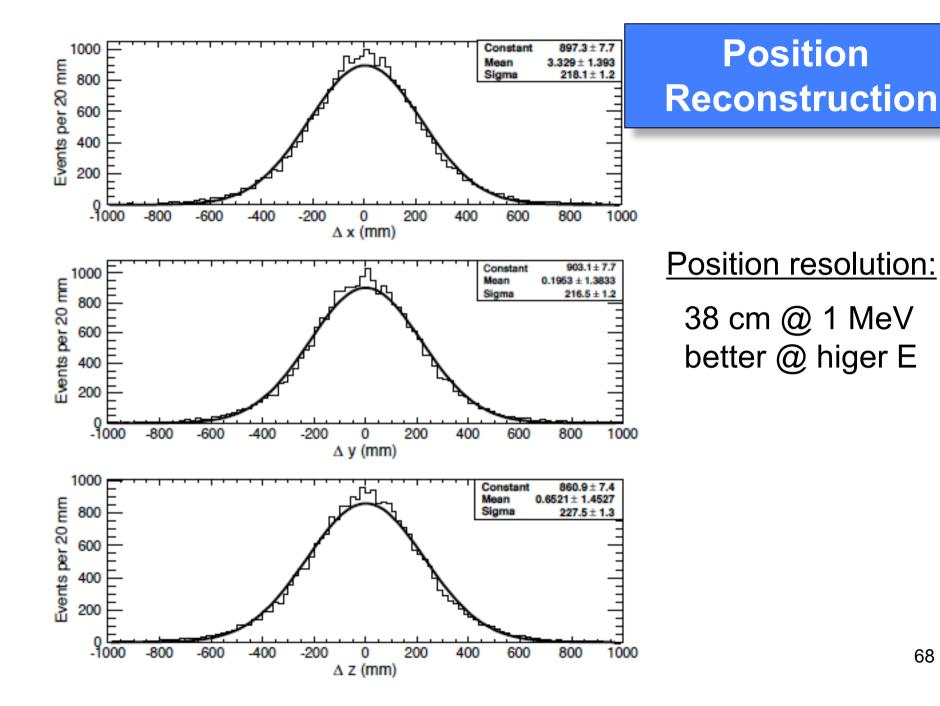
Overview of Preparation (cont'd)

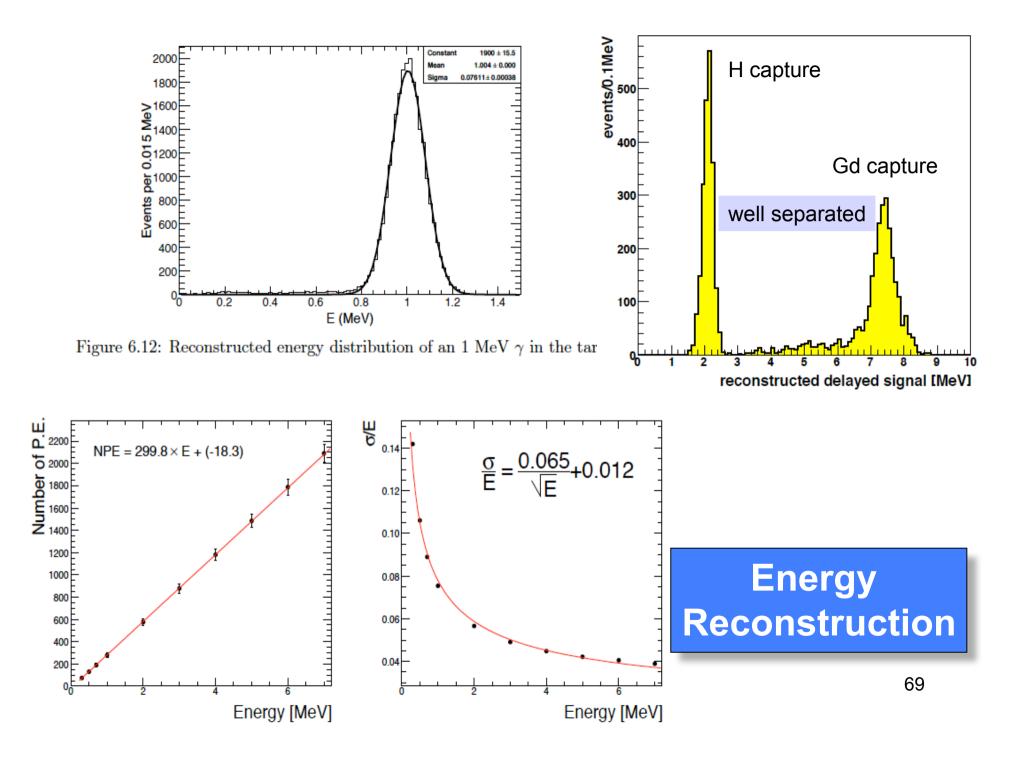
- ✓ Real detector: almost ready!
- ✓ Simulation software: modified KamLAND software (ready!)
- □ Reconstruction software: under way

Data Vs. Simulation



67





To-do List (2011. 1 ~ 2)

- □ Jan. 14 ~ 24 : Detector closing <100%>
- □ Jan. 24 ~ 28: Installation of electronics huts&control rooms <100%>
- Jan. 24 ~ Feb. 15 : Installation of HV and DAQ <70%>
- Jan. 24 ~ Feb. 18 : Installation of liquid scintillation handling system <100%>
- Feb. 16 ~ 28 : Start data taking as dry run (w/o liquids)

< started on Feb. 19, currently on-going >

*** Feb. 19 ~ Apr. 15 : Make & fill liquid scintillator (2 x 16 ton)

Apr. 15, 2011: aiming for the first physics data taking!

RENO Completion Ceremony

□ When: Apr. 15, 2011

□ Where: YongGwang nuclear power plant, S. Korea

□ Who: many science related people

U What:

- -- push the button for data taking!
- -- announce to mass-media,
- -- press conference,
- -- make/distributes booklets,
- -- etc...

RENO in Mass Media (2010. 9~2011.1)

KBS 9시 News (2010.11.8)

한겨레신문 (2011.1.5)





우주가 탄생할 때 이 입자들이 동시에 만들어졌는데요.

우리가 이 입자에 대해 잘 알게 되면 우주 생성에 대한

비밀을 우리가 이해할 수 있게 되는 것입니다.

김수봉 서울대 물리천문학부 교수





아 선도적인 과학자그룹으로 육성해 우리 나라 기초과학을 세계적 수준으로 끌어올 리려는 몸적으로 성도연구세터 지원을 시 사이는 특히그 또 한도한 120여 개월을 지 상한 시 20년이 됐다. 그동안 200여개의 연 구센터들이 모두 1조1천여억원의 연구비를 지원받아 술한 성과들을 일궈냈다. 현재도

28 2011년 1월5일 수요일

선도연구센터

┢ '외길 20년' ● 한국중성미자연구성E

1990년 정부와 한국과학재단(현 한국연

구재다)이 가 대하의 유수 여구이러운 모

영광원전 중성미자 변환상수 측정 실험 장치

높이 70m 원자:



10의 19제곱개(1000억개의 100억배)의 (

자중성미자가 나온다. 이것을 원전 근처

자로 바뀌는 경우는 100km 이상 지나서야

김수봉 교수는 "우리나라에 원자로 6기

며 "위자로 1기단 2조위세 따져 12조위짜리

"경남도민일보가 썼다면, 그기 맞는기라!"

입으키지 않는 시비로운 소리자다. 또 서로 다. 한자들은 월자편반전소 옆에 2개의 건 가 하꺼버에 모여 있는 곳이 운전과 영광 이다. 긴 코수는 "지근까지 우리 여구탑에

원자령방전소의 원자로 1기에서는 초단 가송기를 이미 보유하고 있는 생이니, 건충 말했다.

몸체를 바꾸는 변화무장한 입자들이다.과 출기를 설치하면 중성미자 변환상수를 손 원전 두군데나 된다는 사실은 행운이었다"

학자들은 중성미자에 대해 많은 것을 알아 쉽게 잴 수 있을 것이라는 백서를 내놨다.

내지만, 전자중성미자가 뮤온중성미자로

경남도민이라면 경남도민일보

우주 탄생의 마지막 비밀을 찾아서...

기만 만들면 된다는 생각이 들었다"고 말 해다. 1년여에 검치 끈질기 섬들에 저보기 2006년 3월부터 100억원의 연구비를 승인 해퀐다. 경쟁 연구림들보다 3~4년 늦었지 만 세계 2위의 출력을 갖춘 영광원전은 연 Lukol elukoletu

"차라리 물리학이 쉬워" 호사다마라 했

인가. 영광원전 쪽은 배출수로 인한 수온 상승으로 주민과 마찰을 빚고 있던 터라

연구팀이 원전 안에 과학시설을 짓고 싶다

고 하니 난생을 표했다. 주민을 성득해오면

고려해보겠다는 답변만 돌아왔다. 주민들 이나 화경단체는 중성미자가 반사들이 아

나라는 것은 알고 있었다. 그러나 연구시설

요 터너이 추측에 바라서페기무처분자이

로 활용될지를 우려했다. 연구시설은 지하

70m방에 안 돼 페기장으로 쓸 수 없다고

겨우 설득하고 나니, 이번에는 원전 내 시설

을 위한 인허가 절차가 기다리고 있었다.김

교수는 "불리함은 어렵더라도 열심히 하면

지난해 말까지 설치를 마치고 올해.

월부터 측정에 들어가는 것이었지만, 외화

위기로 치솟은 화을 때문에 일본 광세서의

스인 시기를 녹취 인지이 다소 미뢰까다 여

할 수도 있다. 최소 단위가 2g인 저울로 1g

짜리를 잴 수는 없는 노루이기 때문이다.이

좀되면 실패는 연구팀이 아니라 '신의 책임'

행운이 따랐듯이 2014년께 물리학계가 주

목할 논문을 낼 수 있으리라고 확신한다"고

이근영 선업기자 kylee@hani.co.k

함께 갑니다.

HENIT

다르게 봅니다.

구팀은 올해 3월께면 본격적인 중성미자

원거리 건축기

137억년 전 우주가 처음 생경을 때의 지가 있다. 이들 세 중성미자는 3분은 어떠했을까? 우주의 기원을 알 다른 중성미자로 바뀌는데 그 고자 하는 일은 과학적 호기심 이전에 변환상수라 한다. 뷰운중성미

중성미자라

자신이 어떤 존재인지 알고 싶어 하는 타우중성미자, 전자중성미자 이류의 원초적 분능이다. 광향자들은 우중성미자로 변화하는 비율 대폭발 곧 빅뱅으로 우주가 탄생하고 이어 소리자들이 새서되 뒤 우리가 혀 이 됐다. 그러나 저자주서미자 하는 입자들과 물질을 구성하는 입자 쳤다. 되는 입사실과 물질을 가장하는 입사 들로 구성돼 있다는 이론이 세워졌다. 이른바 '표준모형'이다.

137억년전 빅뱅 이해 단초

전자·뮤온·타우 3가지 존재

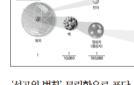
거의 100%나 40~50%여서 쉽기 한국중성미자연구센터가 영 에 설치한 '원전 중성미자 진동



재보고 만질 수 있는 물질이 생겨났다 온중성미자로 바뀌는 정도는 4 는 사실을 밝혀냈다. 여기에는 중력, 전 미해서 측정해낼 수가 없었다.

전자·뷰온·타우와 작을 이루는 세가 물질의 구성 양성지





조금이라도 이해되고 풀릴 수 있는데 인허 가는 상대방의 운직인이 없으면 소용이 없 있다"며 "차라리 물리가 쉽다는 생각이 들 었다"고 희고했다. 인허가에 1년이 걸렸지 만 원자로에서 290m밖에 떨어져 있지 않 은 곳에 검출기를 설치하게 된 것은 연구 팀에게는 큰 행운이었다. 프랑스와 중국의 경우 관계당국 허가를 받지 못해 원전 밖 500m에 검출기를 설치해야 했다. 2008년 터널공사가 시작되고, 2009년부 터는 검출기가 설치되기 시작했다. 애초 목

으로 진행한 연구 논문은 4일치(현지시각)

〈미궁궁린과함원회보〉(PNAS)에 게재됐다

위를 차지할 가능성이 큰 현상을 지칭하는

서의 '무루 있는 자는 받아 풍종하게 되고

독자들께 이런 평가를 듣는 신문을 만들겠습니다. 발행부수 1등보다 독자 신뢰도 1등이 되겠습니다.

정직합니다. 사실을 보도합니다. 독자가 친폐하는 신문이 곧 좋은 신문이라는 신념을 저희 나갑니 어려한 힘에도 적어져 많는 음금은 신문, 강남도민업보입니다.

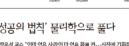
"신문이 다 특관지" 그런 말 듣지 않게 하겠습니다. 관점이 다르면 다르게 보입니다. 특작의 높으로 보겠습니다 그저 반아쓰기나 하는 신문이 되지 않겠습니다.

정난을 생각한니다. 정난사람들의 생각을 당습니다. 지역해 정책, 지역의 발생을 먼저 고민합니다. 지나온 30년 동안 그랬뜻이, 앞으로도 늘 정날도면과 함께 가는 정날도면일보입니다.

마태복음효과는 경제력이나 사회학적







정우성 교수 "이미 얻은 사람이 더 얻을 확률 커…신진에 기회줘 정우성 포항공대(포스텍) 기술경영대학 없는 자는 그 있는 것까지 빼앗 원 교수는 4일 프로스포츠 선수와 과학 석 구절에서 착안해 처음 사용했다 한동을 대상으로 분리한적 반법을 적용해 연구팀은 장수하면서도 계송 분석한 결과 두 그를 모두에서 성공의 법칙 치거나 순성공들이 높은 선수동 인 '마태복음 효과'가 나타났다고 밝혔다. 미 _ 널에 계속 논문을 내는 석학들을

국 보스턴대의 유진 스탠리 교수팀과 공동 분석해 보니,초년 시젤에 출전

지위통 언은 사람이 더 많은 경제편이나 지 신지들에게 많은 기회와 투자를

용어로, 미국 사회학자 로버트 머튼이 복음 있다는 사실을 보여주고 있다"고

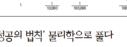
나 저널에 자주 논문을 냈던 사람

할 활동이 높은 것으로 나왔다

정우성 교수는 "이번 연구 결과

어난 스포츠 성수와 과한자들이

www.idomi



RENO in Mass Media (2010. 9~2011.1)

조선일보 (2010.9.7)

朝鮮日報



'영광 原電'서 노벨물리학상 캔다

지난 4일 전남 영광 원자력 발전소 인근 한 야산. 험하 자각김을 지나 산 아래에 도착하니 반공하처럼 생긴 작은 터널이 눈에 들어왔다. 어둑한 동굴 속으로 300m쯤 걸어 들어가니 높이 9m, 지름 9m의 거대한 원통 모양의 구조물이 나타났다.

우주복처럼 생긴 방진복을 입은 과학자 10여명이 형광등 밑에서 자동차 헤드라이트처럼 생긴 장비들 을 원통 내부에 부착하고 있었다. 빛을 감지하는 광센 서였다. 한 중기 빟조차 숨어들지 못하는 동굴 속에 빛을 감지하는 장치라니…. 현장을 지휘하던 서울대 물리천문학부 김수봉 교수는 "영광 원자력 발전소에 서 쏟아져 나오는 우주의근원 입자를 검출하기 위한 거대한 실험실"이라고 말했다. 그가 말한 우주의 근 위 인자라 '유령인자' 라고도 불리는 주석미자/中性 徽子・neutrino)이다. 김 교수는 "바로 여기서 노벨 상에 도전할 연구가 진행될 것"이라고 말했다.

◆중성미자는 유령입자

지금 이 순간도 1초에 수백조개가 넘는 중성미자 가 우리 몸을 통과해 지나가고 있다. 하지만 우리는 이를 느끼지 못한다. 존재는 하지만 감지할 수 없는 인자 과학자들은 중성미자를 '유령 인자' 라고 부른 다. 이 '유령'을 처음 찾아낸 사람은 미국의 프레데 릭 라이네스였다. 그는 1956년 중성미자를 처음 찾아 낸 공로로 1995년 노벨물리학상을 받았다.

현대 물리학의 핵심인 '표준 모형(Standard Model)'에서는 우주가 137억년 전 대폭발(Big Bang)로 생겼다고 섬명한다. 빅뱅 직후에는 비슷한 숫자의 입자와 반입자(입자와 만나면 빛을 내며 사 라진다)가 있었는데 어느 순간부터 입자 수가 많아 지며 우주와 물질이 생겼다는 것이다.

재한다. 6종의 기본 입자 중 'u쿼크(quark)'와 'd쿼 있는 실마리가 찾으려 애써왔다. 우주생성의 비밀을 크', '전자(electron)'는 수소와 산소 등 각종의 물 풀 열쇠를 찾으려는 것이다. 질을 구성하는 기본 요소로 쓰였다.

그리고 물질을 구성하지는 않지만 여전히 우주 속 을 가득 채우고 있다는 미지의 세 입자. 그게 중성미자 하기 위해서는 역설적이게도 거대한 실험시설이 필 것이 될 확률이 높다. 게다가 이 실험 시설은 설계부 이다. 이들 세가지 중섬미자들은 시간이 지나면서 서 요하다. 지표상에는 중섬미자 말고도 우주에서 날아 터 제작까지 우리 혐으로 해 낸 것이라 의미가 크다. 로 바뀌는 성질을 갖고 있다. A가 B로 변하고 B는 C로 오는 수많은 우주선(宇宙線)이 있어 중성미자만 검 영광(전남)=이재원 조선경제i 기자 true@chosu.com



전남 영광 원자력발전소 인근에 설치된 중성미자 검출장 치 내부. 안쪽에는 아크릴로 만든 원통이 두 개 더 들어 있다. 여기에 중성미자를 만나면 빛을 내는 150t의 화학

물질이 채워질 예정이다

영광 원자력발전소 중성미자 검출시설

근거리 검출기

서울대 국내 독자기술로 제작한

'중성미자' 검출기 올 연말 가동…

우주 생성의 비밀 풀어줄 열쇠

◆거대한 실험시설이 필요

과 같은 핵융합 과정에서도 나오지만, 원자로에서 일 어나는 핵분열 과정에서도 생산된다. 원자력 발전소 주벼에 우주이 다른 어느 고가비다 주셨미자가 많은 원거리 검출7

것이다. 이 같은 아이디어를 실현하기 위해 포라스에

중국은 곧바로 원전 인근에 실험시설을 짓기 시작했

과학자들은 친근 더 중육적이 반법을 찾았다. 위지

력 발전소를 활용하는 것이다. 중성미자는 태양 활동

다. 국내에서도 서울대 물리천문학부 김수봉 교수 연 구팀이 2006년부터 세계 2위 규모의 영광원전 주변어 실험 시설 건설을 착수해 올 연말 완공을 앞두고 있다. ◆ 설계에서 제작까지 독자 기술

영광의 서울대 연구진은 현재 원자력 발전수 인근 에 두 개의 중성미자 검출기를 건설중이다. 원전의 중심과 가까운 거리(300m)에 한 개, 먼 거리(1.4km) 에 또 한 개를 설치해 두 곳을 비교하려는 것이다. 검 출기 건설은 거의 끝나가는 중이다. 연구진은 이날 원거리 검축기 아쪽에 행심 부풍이 관세서 430개를 모두 불였다. 광센서 부착이 끝나고 300t의 물과

의미있는 연구 나오면 노벨상 유력 150t의 반응 물질(중성미자와 만나면 빛을 내는 물 집)을 원통 안에 채우면 검출기는 뚜껑을 닫는다. 되는 식이다. 연구진은 이 세가지 중성미자들이 서로 검출기의 작동 원리는 이렇다. 원전에서 발생한 중 이때 존재했던 기본 입자의 종류는 12가지, 그 중 바뀔 확률을 알아내려 하고 있다. 물리학계는 그간 중 성미자는 산을 통과해 원통 안으로 들어온다. 그리고 절반이 사라지고 현재 우주엔 6종의 기본 입자가 존 성미자를 연구해 대폭발 직후의 과정들을 설명할 수 반응 물질을 만나는 순간 빛을 내는데 이것을 광센서 가 잡아낸다. 김수봉 교수는 "옴 연망 본격 연구를 시 작해 3년 정도 측정한 데이터를 모으면 결과를 발표 할 수 있을 것 같다"고 설명했다. 우리 연구진이 의 눈에 보이지도, 느껴지지도 않는 중성미자를 검출 미 있는 결과물을 가장 먼저 내놓으면 노벨상은 우리

물리학과 첨단기술

SAME IN THE REAL PROPERTY OF 문왕입자 밝힌 파지막 비밀 상는다. PRINTER AND ADDRESS OF A PRINTER OF A PARTY AND A REAL AND and the second se EVENING CONTRACTOR CONTRACTORS AND INCOMENTATION OF A DESCRIPTION OF A CONTRACTOR STATE 10.00



지리 동문리는 열려락



1

물리학과 첨단기술 11월호 (2010.11)

S&T Focus (2010.9)



Application of RENO θ_{13} Result

(Of course, the θ_{13} measurement itself is very meaningful!)

□ Accelerator-based neutrino CP violation experiments $(\theta_{13} = 0)$

arXiv:1003.5800

□ Neutrino mass hierarchy measurement (not too small θ_{13})

□ precise measurement of atm. neutrino oscillation parameters

in IceCube DeepCore in Super-K

PRD 81, 113008 (2010) PRD 82, 093011 (2010)

Other Physics Topics in RENO

✓ Supernova neutrinos: galactic supernova

✓ Sterile neutrinos ?

✓ Mass varying neutrinos

✓ Geo-neutrinos

✓ Precise measurement of θ₁₂:
 -- with a longer baseline (20 - 30 km, or 50 - 70 km)

✓ Reactor physics

Brief History of Neutrinos

- 1930: Pauli postulated neutrino to explain β decay problem (3body kin. 2body)
- 1933: Fermi baptized the neutrino in his weak-interaction theory
- <u>**1956</u>**: first discovery of neutrino (\overline{v}_e) by Reines & Cowan from reactor</u>
- 1957: neutrinos are left-handed by Goldhaber et al.
- <u>**1962</u>**: discovery of v_{μ} by Lederman et al. (Brookhaven Lab)</u>
- 1974: discovery of neutral currents due to neutrinos
- 1977: tau lepton discovery by Perl et al. (SLAC)
- 1998: **atmospheric** neutrino oscillation observed by Super-K (confirmed by K2K & MINOS) **2000**: v_{τ} discovery by DONUT (Fermilab)
- 2002: solar neutrino oscillation observed by Kamland (confirmed by KamLAND)

2014 ?: reactor neutrino oscillation ??? Hopefully....!!! 76

Summary



- \Box RENO's sensitivity for measuring θ_{13} is sin²(2 θ_{13}) > 0.02
- □ RENO is near completion.
- □ Data –taking is expected to start in April 2011.
- □ International collaborators are still being invited.

Thank you!





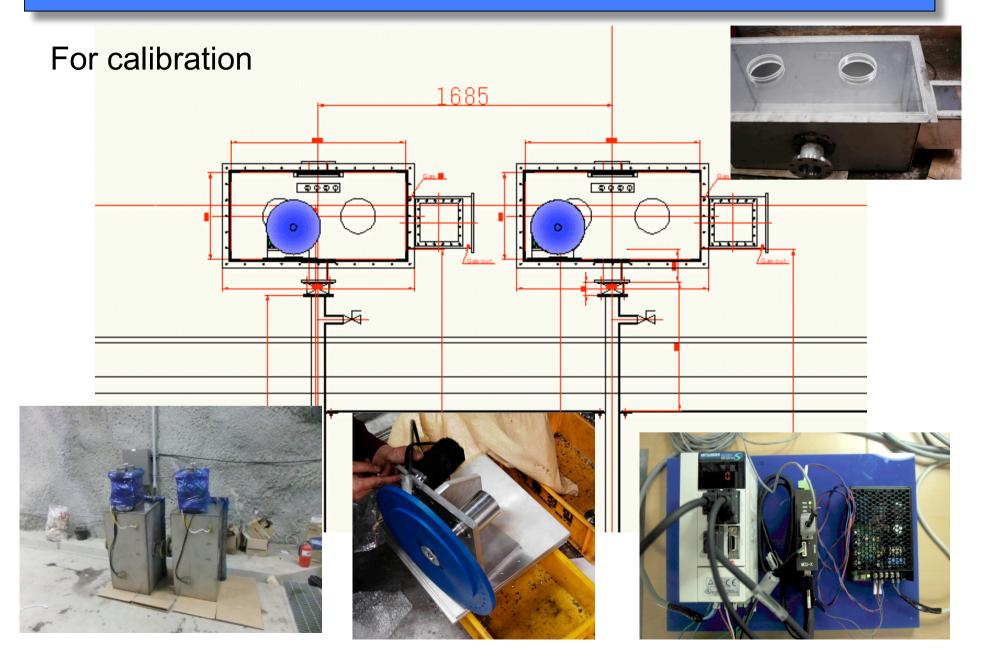
서울대 김수봉 교수가 이끄는 RENO 실험팀. 30여년간 관측에 실패한 미지막 중성미자 변환상수를 밝히기 위해 프랑스 중국과 치열한 경주를 벌이고 있다.

Calibration

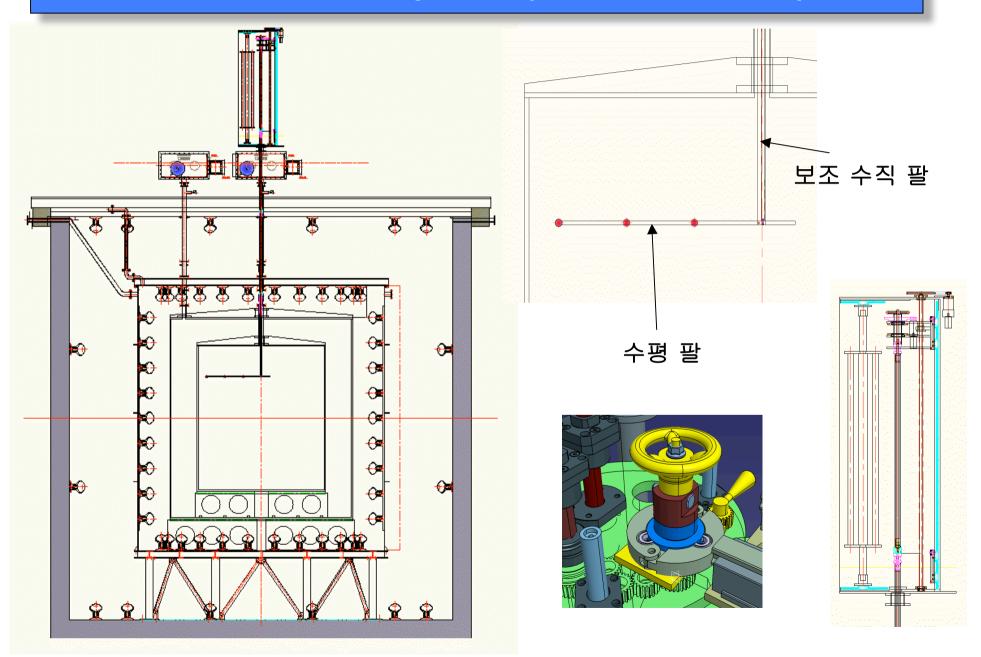
- 1. Radioactive sources: Cs, Co, Ge, Na, Cf
 - -- 1D (z) position, SPE resolution (using source driving system)
 - -- 3D vertex resolution (using robot arm driving system)
 - -- Gd capture reaction (Cf)
- 2. LEDs: UV and blue LEDs -- SPE resolution
- 3. Laser light:
 - -- 5 injectors (via multiplex from semi-conductor laser) connected to 5 optical fibers (top: 1, bottom: 1, barrel: 3)
 - -- PMT uniformity check

** RENO Invites international collaborators who will be responsible for the RENO calibration especially. (Calibration facilities are ready!)

Glove Box and Source Driving System (2010. 10~12)



3D Calibration System (2010. 8 ~2011. 2)





Note:

This proposal is an outcome of the discussion with Prof. Soo-Bong Kim (RENO spokesman, & director of Korea Neutrino Research Center) while I was visiting Seoul National University for the RENO collaboration meeting where I was invited as an observer member of RENO.



Why Korea-Sweden "Neutrino" Research Center?

- 1. Both sides have active neutrino communities.
 - -- Sweden: IceCube (Stockholm U, Uppsala U.) neutrino phenomenology (KTH)
 - -- Korea: RENO (13 university group) T2K, Super-Kamiokande

2. Strong interest in international collaboration for RENO. (RENO is an exciting reactor neutrino experiment to measure the last undetected neutrino mixing angle of theta_13 from 2011.)

3. Desire for longer-term collaboration in future neutrino program.

** Korean government is very interested in exchange program with Sweden.

How to establish the neutrino research center?

- 1. Prepare for a common research plan & proposal.
 - -- obtain a list of interests from both sides.
 - -- build an organization of participating institutions.
 - -- prepare for MOU.
- 2. Establish international collaboration for RENO.
- 3. Submit a proposal to establish the center. (Ex: apply grant for 500 M won (~3 M Kr) per year for 9 years)

(* There is KNRC (Korean Neutrino Research Center) in Korean side.)

http://www.knrc.kr/v1/main/index.php

Action Items

Submit a proposal to a Korean funding agency.

* Example: 500 M won (~3 M Kr) per year for 9 years.
-- 200 M won: salary for about 3-5 (?) researchers
-- 150 M won: travel expenses for exchanging scholars
-- 50 M won: workshops and seminars
-- 100 M won: overhead (20%)

"RENO welcomes foreign collaborators, and wishes to obtain exciting results soon together!"

--- Special message from the RENO spokesman

If you are interested in joining RENO & KSNRC, the RENO spokesman is willing to visit Sweden and invite you formally, before you do anything else.

(so, please let me know your interest!)

RENO Technical Design Report hep-ex/1003.1391 (Mar., 2010)