เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังในแง่มุมทางเทคโนโลยีและความปลอดภัย

นางสาว วราภรณ์ ลามศรีจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538
ISBN 974-632-323-7
ลิขสิทธิของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16796254

TECHNOLOGICAL AND SAFETY ASPECTS OF NUCLEAR POWER REACTORS

Miss Vaporn Lamsrichan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-632-323-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังในแง่มุมทางเทคโนโลยีและความปลอดภัย
โดย นางสาววราภรณ์ ลามศรีจันทร์
ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. วิรุฬห์ มังคละวิรัช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. สุพิชชา จันทรโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์วิรุฬห์ มังคละวิรัช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร.สุพิชชา จันทรโยธา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วราภรณ์ ลามศรีจันทร์ : เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังในแง่มุมทางเทคโนโลยีและความปลอดภัย (TECHNOLOGICAL AND SAFETY ASPECTS OF NUCLEAR POWER REACTORS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.วิรุฬห์ มังคละวิรัช, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.สุพิชชา จันทรโยธา 135 หน้า. ISBN 974-632-323-7

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหลักการทำงานและระบบความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังเชิงพานิชย์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันแบบ PWR BWR และ CANDU รวมทั้งทำการรวบรวมการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังเชิงพานิชย์ในอนาคตทั้งในแบบรุ่นใหม่และแบบขนาดกำลังต่ำในแง่ของเทคโนโลยีและระบบความปลอดภัย พร้อมทั้งดำเนินการวิเคราะห์เปรียบเทียบเทคโนโลยีและระบบความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังดังกล่าวของกลุ่มเดียวกัน ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบพบว่า เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนับว่ามีความปลอดภัยเพียงพออุปกรณ์พื้นฐานบางส่วนจึงยังคงไว้ แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังในอนาคตได้มีการพัฒนาระบบอุปกรณ์และเครื่องมือ รวมทั้งการส่งสัญญาณข้อมูลต่างๆ และมีการออกแบบห้องควบคุมใหม่ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดในการทำงานของเจ้าหน้าที่ นอกจากนี้ ได้มุ่งเน้นพัฒนาระบบการระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉินและระบบการหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังรุ่นใหม่ สำหรับในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังขนาดกำลังต่ำได้มีการพัฒนาใช้ระบบความปลอดภัยธรรมชาติ จากการพัฒนาดังกล่าวทำให้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังในอนาคตมีค่าการเสี่ยงภัยของอุบัติเหตุแกนปฏิกรณ์หลอมละลายเป็น 10^{-6} ต่อเครื่องใน 1 ปี ซึ่งมีความปลอดภัยมากกว่ารุ่นปัจจุบันที่ใช้งานอยู่ถึง 10 เท่า

ภาควิชา .....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา .....-..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา .....2537..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

##C418020 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: POWER REACTOR / NUCLEAR REACTOR

VARAPORN LAMSRICHAN : TECHNOLOGICAL AND SAFETY ASPECTS OF NUCLEAR POWER REACTORS. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. VIRUL MANGCLAVIRAJ, THESIS CO-ADVISOR : SUPITCHA CHANYOTHA, Ph.D. 135 pp.
ISBN 974-632-323-7

Technical, principle and safety systems of three types current commercial nuclear power reactors; PWR, BWR and CANDU; were studied and gathered. The evolutionary designs which have been developed by reactor vendor for new commercial LWRs (Advanced and Simplified Reactor) and PHWR (CANDU-3) were carefully investigated. The comparison analyses between each type of current commercial and future reactors were done in terms of technological development and safety system improvement. The results showed that the safety measures of present reactors were considered completely adequate while the basic features were retained. Advanced instrumentation and multiplex signal transmission were featured. The control rooms were redesigned according to human factors principles. Two main safety systems; Emergency Core Cooling Systems and Control Systems ; were developed and improved. The passive safety features were introduced as safety implementation in Simplified Reactors. For those reasons, probability of the risk of serious core damage frequency of the next generation power reactor was found to be 10^{-6} /reactor-year which was 10 time lower than that of present nuclear power reactor.

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา - ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2537 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ฉ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ช
กิติกรรมประกาศ ..... ซ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่

1. บทนำ .....
ความเป็นมาของปัญหา 1
วัตถุประสงค์ 4
ขอบเขตของการวิจัย 4
ขั้นตอนการวิจัย 5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ 6

2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง 7
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังชนิดต่างๆ 10
เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังเชิงพานิชย์แบบต่างๆ 11
1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR 11
2.เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR 30
3.เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU 45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3. การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง

ทิศทางการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง 57

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังรุ่นใหม่ 58

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ APWR 58

2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System80+ 65

3. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR 70

การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังขนาดกำลังต่ำ 79

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR 80

2. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP-600 85

3. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR 90

4. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 94

4. วิเคราะห์เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง .....

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR 98

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR 101

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU 104

5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผล 105

1. สถานภาพเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน 105

2 .การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลัง 106

3. แนวโน้มของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังในอนาคต 107

ข้อเสนอแนะ 108

เอกสารอ้างอิง 109

ภาคผนวก 114

ประวัติผู้เขียน 135

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์วิรุฬห์ มังคละวิรัช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.สุพิชชา จันทรโยธา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของงานวิจัยมาด้วยดีตลอด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์กำกับความปลอดภัยโรงงานนิวเคลียร์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้การสนับสนุนในการค้นคว้าข้อมูล

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และคุณสุพัตรา วัชรสุรกุล ขอขอบคุณ คุณพรชัย วัชรสุรกุล ที่ให้ทั้งกำลังกายและกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 เปรียบเทียบการทำงานโรงไฟฟ้าถ่านหินกับโรงไฟฟ้านิวเคลียร์..... 3
2.1 ปฏิกิริยาลูกโซ่ 8
2.2 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR..... 12
2.3 (ก) ทิศทางการไหลเข้า-ออกของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิภายในถังปฏิกรณ์ 13
(ข) ทิศทางการไหลเข้า-ออกของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิระหว่างถังปฏิกรณ์กับเครื่องผลิตไอน้ำทั้ง 4 ตัว 13
2.4 แท่งเชื้อเพลิง 14
2.5 การจัดเรียงมัดแท่งเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ 15
2.6 ระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม 16
2.7 ถังปฏิกรณ์และอุปกรณ์ภายใน 17
2.8 เครื่องผลิตไอน้ำแบบ U-tube 18
2.9 (ก) เครื่องควบคุมความดันด้วยไอน้ำ 19
(ข) แผนผังแสดงการควบคุมความดันของเครื่องควบคุมความดัน..... 19
2.10 กราฟการดูดจับ Resonance Neutron ของยูเรเนียม-238 22
2.11 ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน 27
2.12 วงแหวนรอบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์และระบบ annulus air clean up 28
2.13 ระบบระบายความร้อนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ 29
2.14 อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ 29
2.15 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณีนิวเคลียร์กำลังแบบ BWR 30
2.16 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ระบบผลิตไอน้ำโดยตรง 31
2.17 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ระบบผลิตไอน้ำทางอ้อม 32
2.18 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR ระบบผลิตไอน้ำวงจรคู่ 32
2.19 เม็ดเชื้อเพลิง แท่งเชื้อเพลิงและมัดแท่งเชื้อเพลิง 33
2.20 การจัดเรียงมัดแท่งเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์ 34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.21 แท่งควบคุม 35
2.22 ระบบการเคลื่อนที่ของแท่งควบคุม 36
2.23 ถังปฏิกรณ์และอุปกรณ์ภายใน 36
2.24 เจทปั๊ม และการไหลเวียนของน้ำที่ฉีดออกจากเจทปั๊ม 37
2.25 การควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ด้วยการควบคุมความดันของไอน้ำ 39
2.26 ระบบระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์ในสภาวะฉุกเฉิน 42
2.27 อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในแบบต่าง ๆ 43
2.28 ระบบระบายความร้อนในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ 44
2.29 โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU 46
2.30 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU..... 47
2.31 เชื้อเพลิงและมัดแท่งเชื้อเพลิง 48
2.32 ถังคาแลนเดรีย 49
2.33 เครื่องเปลี่ยนเชื้อเพลิง 50
2.34 ทิศทางการไหลเข้า-ออกของน้ำระบายความร้อนปฐมภูมิ 51
2.35 Shutdown System No.1 53
2.36 ระบบฉีดสารละลายกาโดลิเนียมในเตรตของ Shutdown System No.2 54
2.37 ระบบหยุดเดินเครื่องฉุกเฉิน (SDS-1 และ SDS-2) 54
2.38 อาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ 55
3.1 เปรียบเทียบขนาดถังปฏิกร์เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR กับ APWR 59
3.2 วงจรระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน 60
3.3 มัดแท่งเชื้อเพลิงที่ปรับปรุง 61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.4 ห้องควบคุม 62
3.5 ถังปฏิกรณ์ เครื่องควบคุมความดันและเครื่องผลิตไอน้ำ 67
3.6 เปรียบเทียบการหมุนเวียนของน้ำระบายความร้อนเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ 72
กำลังแบบ BWR กับ ABWR .....
3.7 เปรียบเทียบระบบการทำงานของระบบขับเคลื่อนแท่งควบคุม 72
3.8 เปรียบเทียบอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ 73
3.9 ห้องควบคุม 74
3.10แท่งหุ้มเชื้อเพลิงที่ปรับปรุง 76
3.11 แกนปฏิกรณ์ที่ปรับปรุง 76
3.12 ระบบความปลอดภัย 82
3.13 การไหลของน้ำภายใน Accumulator 82
3.14 การระบายความร้อนภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกร์ภายหลังอุบัติเหตุ 83
3.15การไหลเวียนของน้ำระบายความร้อนภายในเครื่องผลิตไอน้ำกับ
Condensate storage tank 84
3.16 ระบบ Safety Injection 86
3.17 ระบบระบายความร้อนปฐมภูมิ 87
3.18 การระบายความร้อนระหว่างอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์ชั้นในและชั้นนอก .. 88
3.19 ระบบความปลอดภัยธรรมชาติ 91
3.20 ขนาดถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR กับ SBWR 92

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังชนิดต่าง ๆ 10
2.2 แสดงบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและสัญญาณที่จะทำให้หยุดเดินเครื่อง 25
2.3 แสดงบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและสัญญาณที่จะทำให้หยุดเดินเครื่อง 41
2.4 แสดงบริเวณที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดและสัญญาณที่จะทำให้หยุดเดินเครื่อง 53
3.1 สรุปผลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR 63
3.2 สรุปผลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ System 80+ 70
3.3 สรุปผลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ ABWR 77
3.4 สรุปผลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SPWR 84
3.5 สรุปผลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ AP-600 89
3.6 สรุปผลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ SBWR 93
3.7 สรุปผลเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU-3 97
4.1 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ PWR 98
4.2 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ BWR 101
4.3 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังแบบ CANDU 104
5.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์กำลังที่พัฒนา 106