

出國報告（出國類別：實習）

赴美國參加美國核能管制委員會舉辦
之 F - 201（Fuel Cycle Process）研習公
差報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：曾怡仁 副工程師

派赴國家：美國

出國期間：100 年 9 月 10 日~100 年 9 月 18 日

報告日期：100 年 10 月 31 日

摘 要

本次赴美國核能管制委員會（Nuclear Regulatory Commission，簡稱NRC）職業發展中心參加F-201(Fuel Cycle Process)研討會，學習核燃料循環過程的相關安全規定與知識。NRC對核燃料循環過程的管制規範，除了採礦方式之外，從鈾礦的萃取、黃餅製作、鈾濃縮、氧化鈾燃料丸成型、再經反應爐燃料使用，最後到用過核燃料貯存均有詳細的條文作為執法的依據。整體課程的安排首先簡介法令規範、再依管制考量及技術要求，進一步說明美國管制單位對相關議題施行之實際作法及成效。

本次研習內容主要包含核燃料循環過程的安全考量與事故分析，另討論核燃料防止擴散的管制議題。整理研習心得之外，並提出建議事項，期能將所學回饋於日後實際核燃料研究與管理業務。

目 次

摘 要	i
壹、目 的	1
貳、過 程	2
參、心 得	3
肆、建 議 事 項	8
伍、附 件	9
附件一 F - 201核燃料循環課程表	9
附件二 F - 201核燃料循環課程講義	10

壹、目的

本次出國研習的主要目的有以下三項：

- 一、 厚植核燃料工作專業知識：藉由參加NRC職業發展中心安排之訓練課程，學習核燃料循環過程的相關規定與知識。
- 二、 了解核燃料安全管制作業：藉由與NRC專家們所進行之課堂討論，瞭解美國管制單位對核燃料管制執行情形及成效，俾利日後執行核燃料研究或審查作業之參考。
- 三、 參加美國NRC舉辦之F - 201 (Fuel Cycle Process) 研討會，以了解目前核燃料設計之缺失及改善方法，有助於評估與提升台灣核電廠中核燃料的運轉績效。

貳、過 程

此次赴美，於100年9月10日搭機，9月10日抵達馬里蘭州貝賽斯達市（Bethesda, MD）NRC職業發展中心，進行為期五天（9月12日至16日）的訓練課程。行程簡列如下：

9月10日	搭機赴美（去程）。
9月11日	資料整理與準備。
9月12日至16日	NRC職業發展中心參加F - 201訓練課程。
9月17日至18日	搭機返回台北（回程）。

參、心得

此次赴NRC職業發展中心參加核燃料循環過程之訓練課程，整體課程的安排首先簡介法令規範、再詳述核燃料的相關技術知識。課程的安排（附件一）非常充實，從鈾礦的萃取、黃餅製作、鈾濃縮、氧化鈾燃料丸成型、再經反應爐燃料使用，最後到用過核燃料貯存均有詳細的說明。在所有的課程中，NRC的講員不斷強調如何確保核燃料的使用安全是NRC管制的重心。五天課程中，共有約20個講員說明13個核燃料使用之相關議題。緊湊的安排，與講義（附件二）的準備，讓學員在短暫的時間內，就可獲得核燃料循環過程的完整基本概念，對往後執行核燃料使用與貯存的研究上，有極大的助益。

此次課程研習之內容簡述如下：

- 1) 第一天(09/12)之課程內容主要概述核燃料的循環過程、安全性質與安全法規
 - a) 核燃料循環過程（詳見附件二第一章節）
 - i) 簡介核燃料的循環過程、以及主要製造設施
 - ii) 簡介NRC法規規範
 - iii) 原子核物理回顧
 - iv) 簡介鈾的物理特性與鈾化合物的化學性質
 - b) 核燃料安全性質（詳見附件二第四章節）
 - i) 簡介臨界安全性
 - ii) 簡介核反應臨界現象，說明中子與物質作用，可能會產生的散射、逃逸、核分裂反應現象；簡介核反應臨界現象的主要控制參數，包含有質量、幾何形狀、與減速效應三種。其中所謂質量效應係代表材料愈多則核分裂產生的中子數目愈多；幾何形狀效應係表示材料表面積愈大，中子的逃逸機率愈高；減速效應係代表一定速度範圍內中子速度愈低，反應機率愈大。
 - iii) 簡介核原料之化學安全性質，說明鈾與鈾之放射性危害為 α 粒子，而化學危害之主要來源為粉塵吸入。
 - c) 安全法規

簡介NRC核燃料相關之法規條文（詳見附件二第三章節）。

2) 第二天(09/13)之課程內容主要概述鈾原料之萃取、UF₆轉化、與濃縮過程

a) 鈾原料之萃取過程（詳見附件二第五章節）

- i) 鈾原料之萃取方式主要包含有傳統鈾工廠、堆浸、線上回收鈾之萃取。依據法規10 CFR part 40, appendix A (詳見附件二第五章節p.5)，其規範內容，如以下條列所示，包含有從原始材料萃取鈾或鈷所產生之所有副產物：

Criterion 1 – Site selection

Criterion 2 – Avoidance of proliferation of small waste disposal sites

Criterion 3 – Prime option

Criterion 4 – Tailings ponds design criterion

Criterion 5 – Groundwater protection standards

Criterion 6 – Disposal of waste byproduct material

Criterion 7 – Preoperational criteria

Criterion 8 – Operational criteria

Criterion 9 – Financial surety criteria

Criterion 10 – Minimum charge for long-term surveillance

Criterion 11 – Ownership of tailings and disposal site

Criterion 12 – Final disposition of tailings and disposal site

Criterion 13 – Secondary groundwater protection standards

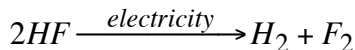
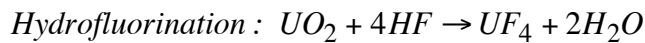
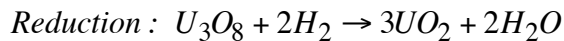
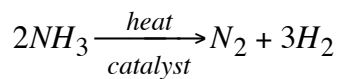
特別要注意的是USNRC並不規範鈾礦之開採，主要是因為開礦相關之規範範圍遠大於核燃料。

- ii) 這個章節的重點又包含有：p.6，US鈾回收機構；p.7，全世界鈾回收之產出；p.8-10，簡介各式貯存方式；p.11，顯示傳統鈾萃取工廠；p.13, 18，量化化學之鈾萃取工廠；p.19-37，現址化學鈾萃取方法。
- iii) 以操作安全性來說，鈾原料萃取過程最危險的步驟為黃餅粉塵吸入，其防護方式為使用口罩。

iv) 總結來說，現址化學鈾萃取方式，直接略過鈾礦開採之氬氣輻射傷害與耗能之礦石壓碎步驟，因此為目前最具經濟效益之鈾萃取方式。

b) 鈾原料UF₆轉化（詳見附件二第六章節）

i) 經萃取之鈾原料成份為U-238 99.28%, U-235 0.71%, U-234 0.0054%。為了進行鈾原料的濃縮，需將固態鈾原料轉化成氣態的UF₆（詳見p.8 UF₆相圖）。通常使用的方法為1)傳統濕式化學(p.16)，2)乾式氟化物揮發製程(p.18)。其中乾式氟化物揮發製程中之Honeywell反應步驟包含有：



- ii) 這個製程中最危險的步驟為液態UF₆的貯存。P. 33為模擬結果，顯示一個約12噸重液態UF₆貯存桶掉落破裂後，UF₆與空氣中之水氣接觸後，因大量反應熱之效應， $\text{UF}_6 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{UO}_2\text{F}_2 + 4\text{HF} + \text{heat}$ ，而產生約3公里長的爆炸火焰。
- iii) 這個製程主要的安全危害為HF/UF₆化學危害，以及較高放射活度所造成UF₆貯存桶之溫度升高問題。

c) 鈾原料濃縮過程（詳見附件二第七章節與第三.4章節）

- i) 鈾原料的濃縮是一個龐大的工程，而濃縮鈾的工廠曾經是全世界最大的工業設施。在1992年，美國國會討論將政府核能機構轉換成私人公司（US enrichment cooperation, USEC）之過程中確保核能管制仍能不間斷之事宜。目前美國有二個鈾濃縮氣體擴散工廠：DOE's Portsmouth site near Piketon, Ohio，以及DOE's Paducah, Kentucky，皆屬USEC管轄。
- ii) 一般來說，鈾濃縮的方式如下列所示：
- (1) Electromagnetic isotope separation
 - (2) Gaseous diffusion
 - (3) Gases centrifuge

- (4) Atom vapor laser isotope separation
- (5) Molecular laser isotope separation
- (6) Separation of isotope by laser excitation
- (7) Plasma separation process
- (8) Chemical exchange
- (9) Ion exchange
- (10) Aerodynamics process
- (11) Thermal diffusion

3) 第三天(09/14)之課程內容主要概述核燃料之製造與製造過程的安全考量

a) 核燃料之製造（詳見附件二第八章節）

- i) 核燃料鈾-235之重量比：PWR, 2.5-5%; BWR, 3-5%; Naval/Research, up to 100%
- ii) 目前NRC共有6個運轉設施，另外在Aiken, SC有一個新的MOX製造設施
- iii) 核燃料之製造流程為：
 - (1) Autoclave, UF_6 (solid) $\rightarrow$ UF_6 (liquid)
 - (2) Hydrolysis, $\text{UF}_6 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{UO}_2\text{F}_2 + 4\text{HF}$ (可改為水蒸汽之乾式化學方法)
 - (3) Precipitation, $\text{NH}_3/\text{NH}_4\text{OH}$, ADU slurry (2-8% solid)
 - (4) Separation, ADU Crystals
 - (5) Heat (calcinations), U_3O_8
 - (6) Heat H_2 reduction, UO_2

b) 核燃料製造過程的安全考量（詳見附件二第十二、十三章節）

- i) 操作安全考量主要防止鈾、鈾、鈾之金屬火災，以及鈾與水反應後之氫氣氣爆
- ii) 核燃料製造過程之設施安全考量主要防止輻射物質遭受竊取，以及防範核燃料設施與運作遭受破壞

4) 第四天(09/15)之課程內容主要概述核燃料之控管、醫療同位素之生產、與用過核燃料之處理

a) 核燃料之控管（詳見附件二第十一章節）

- i) 主要目的為防止未經許可之核子原料之使用、以及防止大量物質用於核子武器之使用；其中所謂之核子原料包含有鈾與鈾之所有同位素；特殊核子原料為鈾，鈾-233，與濃度高於0.7%之鈾 - 235濃縮鈾；策略性特殊核子原料為鈾，鈾-233，與濃度高於20%之鈾 - 235濃縮鈾；
 - ii) 核燃料之控管需要注意準確與精確；例如，當曝露於溼氣環境下，每小時氧化鈾的重量增加1%；量測儀器與設備如圖(p18-21)所示，包含有重量量測、滴定法、紫外光光譜儀、質譜儀、各式非破壞性射線掃描儀、中子計數器、以及 $\alpha\beta\gamma$ 射線掃描儀
 - iii) 擁有超過臨界核燃料質量的非核燃料運轉設施，需要特運轉執照（詳見附件二第九章節）。這些機構包括有：Department of Commerce - NIST/Massachusetts Institute of Technology/Pennsylvania state university/Idaho State University, Pocatello/General electric Vallecitos Nuclear center/Purdue University/University of Texas, Austin/Oregon State University, Corvallis
- b) 醫療同位素之生產（詳見附件二第九.1章節）
- i) 現有醫療同位素之生產機構有：Mo-99 produced in Chalk River NRU (to be expired 2016) using US supplied HEU targets; Other reactors: BR-2 Belgium; SAFARI-1, south Africa, HRF (petten), the Netherlands; and OSIRIS, France
 - ii) 美國未來醫療同位素之生產方式可能為：B&W aqueous homogeneous reactor p.8; Accelerator-induced fission; Activation of Mo-98 in BWR; Conventional target irradiation
- c) 用過核燃料之處理（詳見附件二第十章節）
- i) 用過核燃料之貯存與運送
 - ii) 高放射性廢棄物之貯存與運送，廢棄物之來源包含核電廠之用過核燃料與武器級鈾原料之再處理；用過核燃料之處理方法包括有鈾原料、核分裂產物、與超鈾元素之分離，以回收可裂與可孕核原料；一般所使用之分離方法為濕式電化學

- 5) 第五天(09/16)之課程內容主要概述MOX核燃料之製造處理方法與國際上核燃料循環設施之核子保防需求
- a) 美國MOX核燃料製造與處理之主要目的為將總數約14立方噸之武器級鈾原料，轉換成MOX核燃料以供商業核電廠使用（詳見附件二第十四章節）；其製造方式首先以濕式拋光方式純化氧化鈾，再將氧化鈾與氧化鈾混合壓錠
 - b) 國際上核燃料循環設施之核子保防需求，主要在取得國際共識，以防止非民生用途之核武擴散（詳見附件二第十一.3章節）

肆、建議事項

本次參加NRC職業發展中心安排之核燃料循環過程之訓練課程，有下列國外經驗可供參考：

1. 課程的內容非常充實，在短短五天的時間內，共安排約20個講員說明13個核燃料使用之相關議題。緊湊的安排，與講義的準備，讓學員在短暫的時間內，就可獲得核燃料循環過程的完整基本概念。在所有的課程中，NRC的講員不斷強調如何確保核燃料的使用安全是NRC管制的重心，並在課程開始時首先概述研習目的，並藉由發問及回答提升學習效果。整體而言，課程的進行非常緊湊，而且講師與學員均在極佳的效率下，完成核燃料循環課程的說明與學習。建議，國內舉辦研討會訓練課程時，應朝內容充實與完整的前下進行課程之安排，以求在短時間內，發揮快速學習效果。
2. 本次在NRC職業發展中心，有機會與NRC核燃料循環過程之課程負責人, Michael Raddatz,見面。Raddatz先生表示有興趣來台訪問，並舉辦核燃料相關研習課程。建議，國內亦能定時舉辦核燃料循環過程訓練課程，並邀請NRC相關人員，來台交流，以培養國內通盤了解核燃料整體循環過程之專業人員。

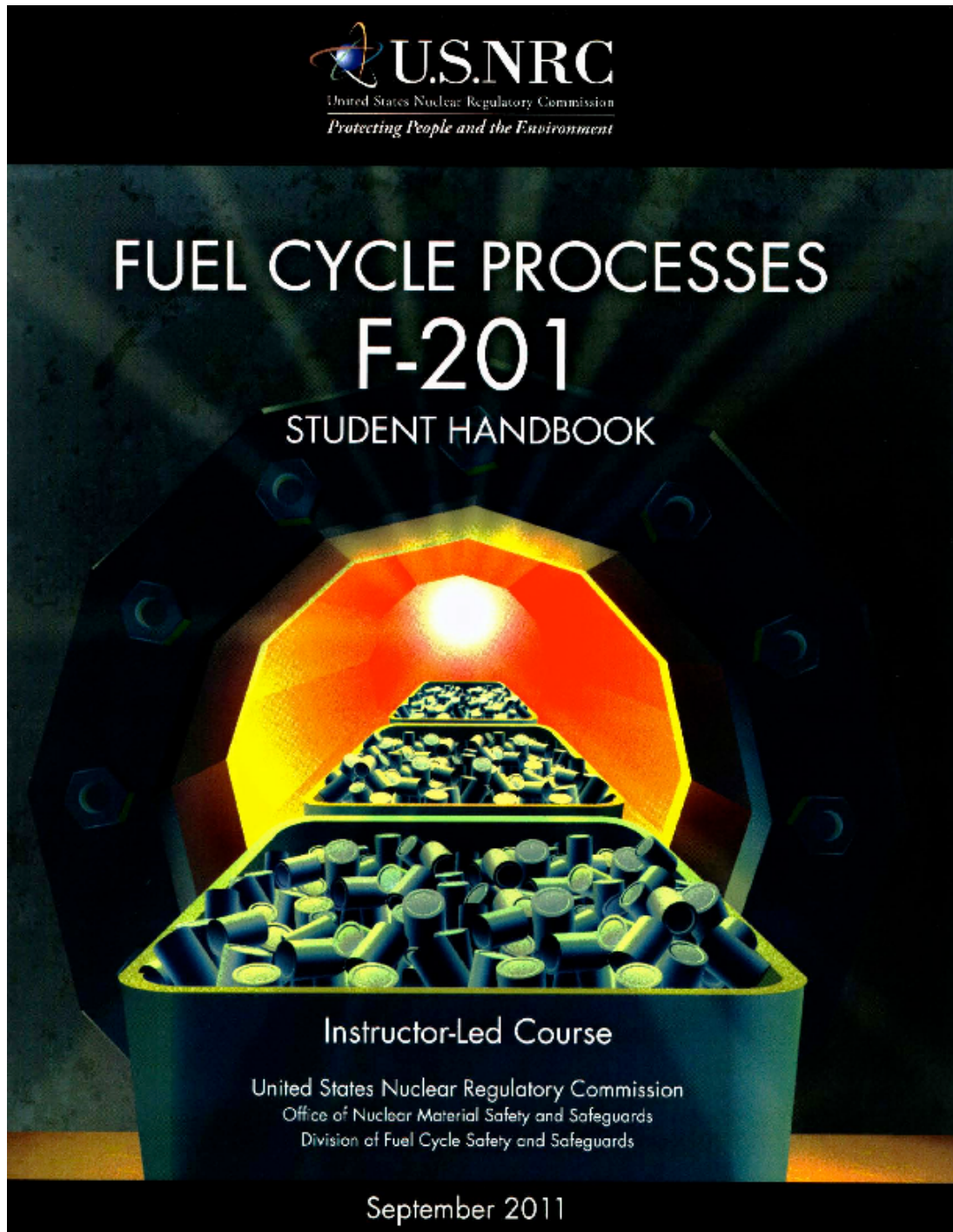
伍、附 件

附件一 F - 201核燃料循環課程表

	September 12	September 13	September 14	September 15	September 16
	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
0800	Introductions	Module 5 Uranium Recovery (D. Mandeville)	Module 8 Fuel Fabrication Process (N. Baker)	Module 11 Material Control and Accounting (T. Grice)	Module 14 MOX (D.Tiktinsky)
0900	Module 1 Overview of the Fuel Cycle (J. Kinneman)			Module 11.1 (T. Pham)	
0930	Module 3 Introduction to the Regulatory Process (M. Bartlett) (J. Smith) (M. Adams) (M. Raddatz)				
1000		Module 6 Uranium Conversion (M. Raddatz)		Module 9 Greater than Critical Mass and Medical Isotopes (C. Tripp) (M. Adams)	Module 11.2 International Safeguards Requirements for Fuel Cycle Facilities (D. Hanks)
1100					
1200	Lunch	Lunch	Lunch (Picnic)	Lunch	Lunch
1300	Module 4	Module 7	Module 13	Module 12	Exam
1400	Introduction to Hazards and Safety Fundamentals (G. Chapman) (N. Baker) (C. Tripp) (M. Raddatz)	Uranium Enrichment (Brian Smith) (Tim Johnson) (M. Raddatz)	INFOSEC, Physical Security and Safeguards (B. Phay) (C. Ramsey)	Fuel Cycle Accidents (K. Ramsey)	
1500				Module 10 Spent Nuclear Fuel, Reprocessing, and HLW (M. Gordon) (B Leslie) HLW	
1615					

附件二 F - 201核燃料循環課程講義

(<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/topic.php?id=48>)



Module 1

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module1.pdf>



Module 1: Overview of the Nuclear Fuel Cycle

John Kinneman, Director
Division of Fuel Cycle Safety and Safeguards

September 2011 1.0 Overview of the Nuclear Fuel Cycle 1

Module 3

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module3.pdf>



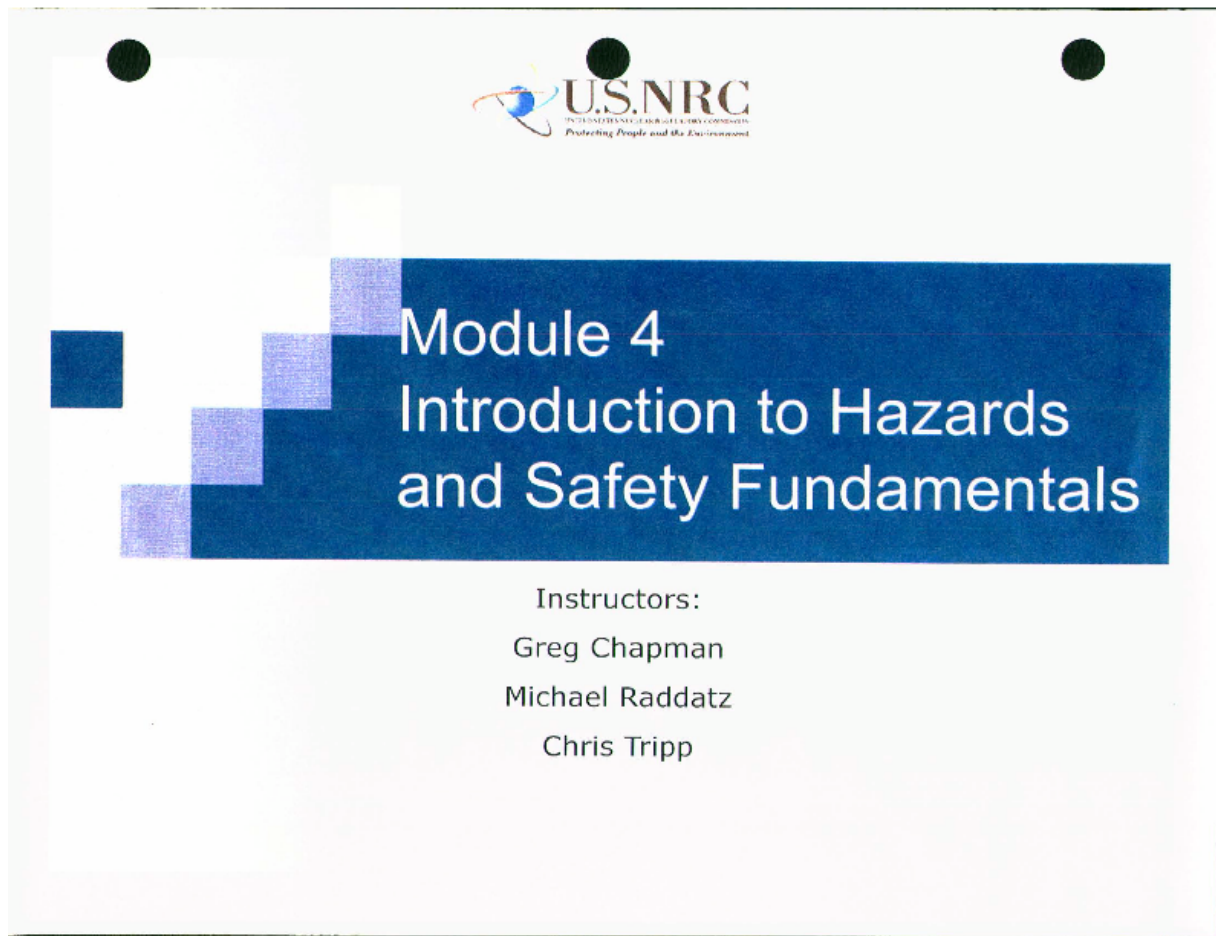
Module 3.0: Introduction to Regulatory Requirements

Instructors:

Kevin Ramsey	Michael Raddatz
Matt Bartlett	Mary Adams
James Smith	

Module 4

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module4.pdf>



Module 5

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module5.pdf>



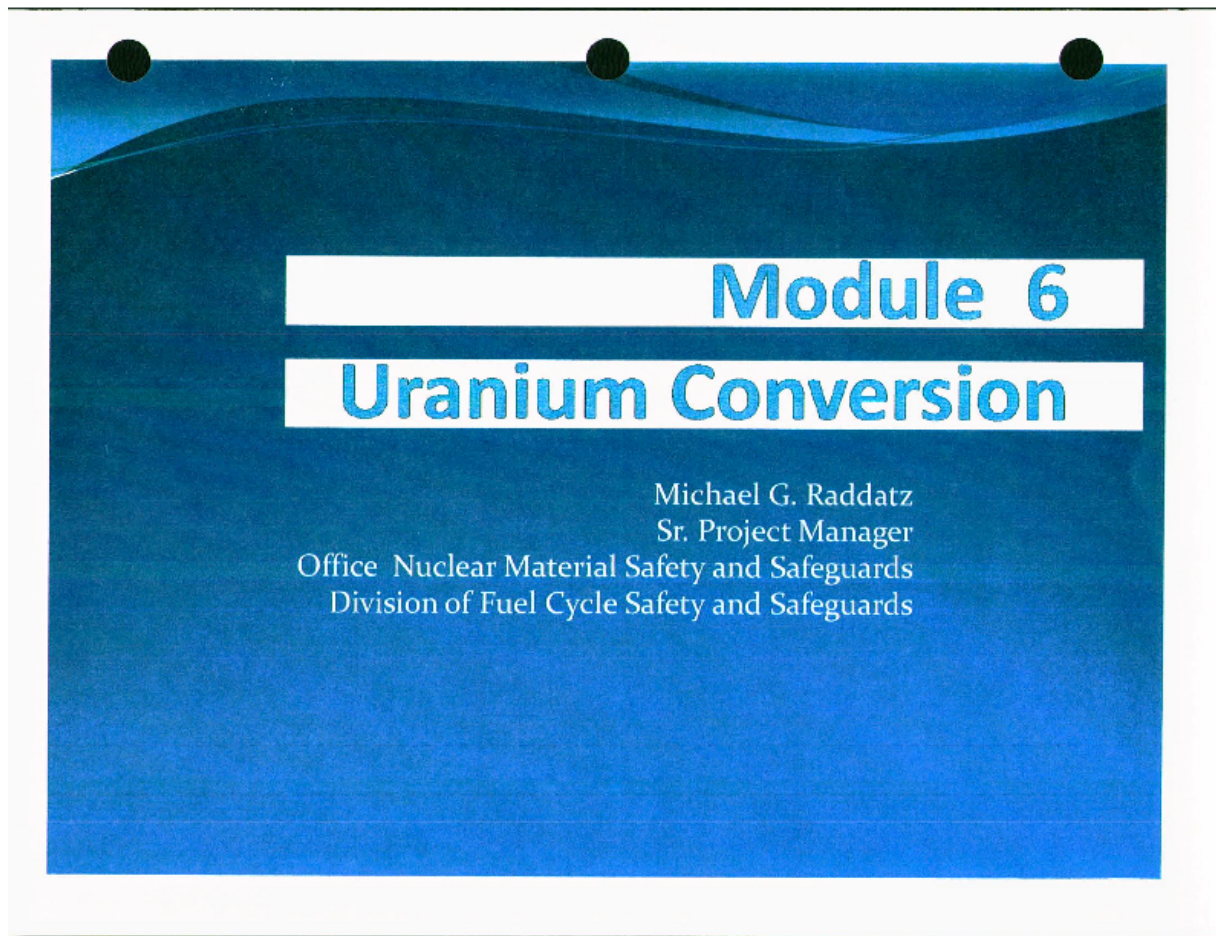
Module 5.0

Uranium Recovery Regulations and Operations/Hazards

Doug Mandeville, FSME/DWMEP
301-415-0724
douglas.mandeville@nrc.gov

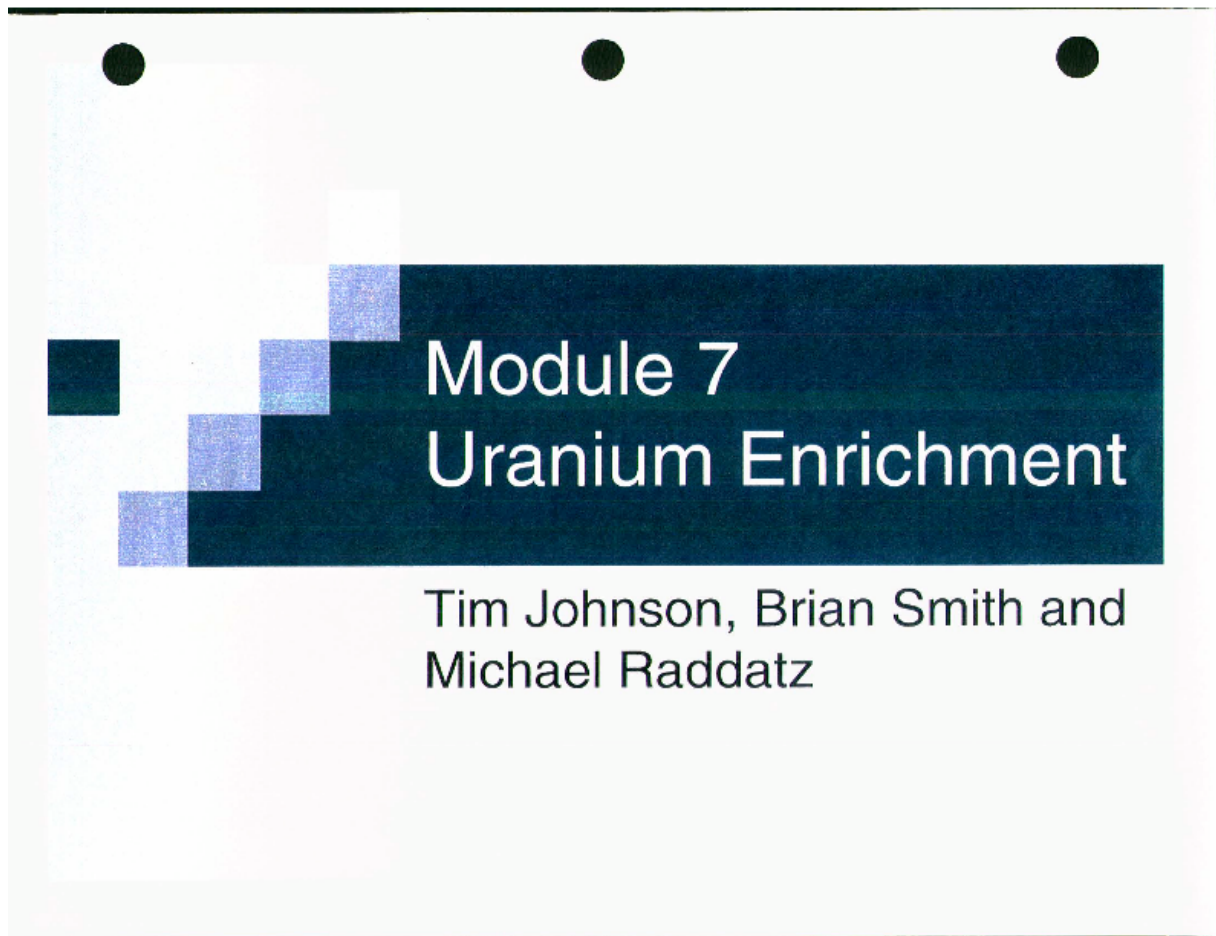
Module 6

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module6.pdf>



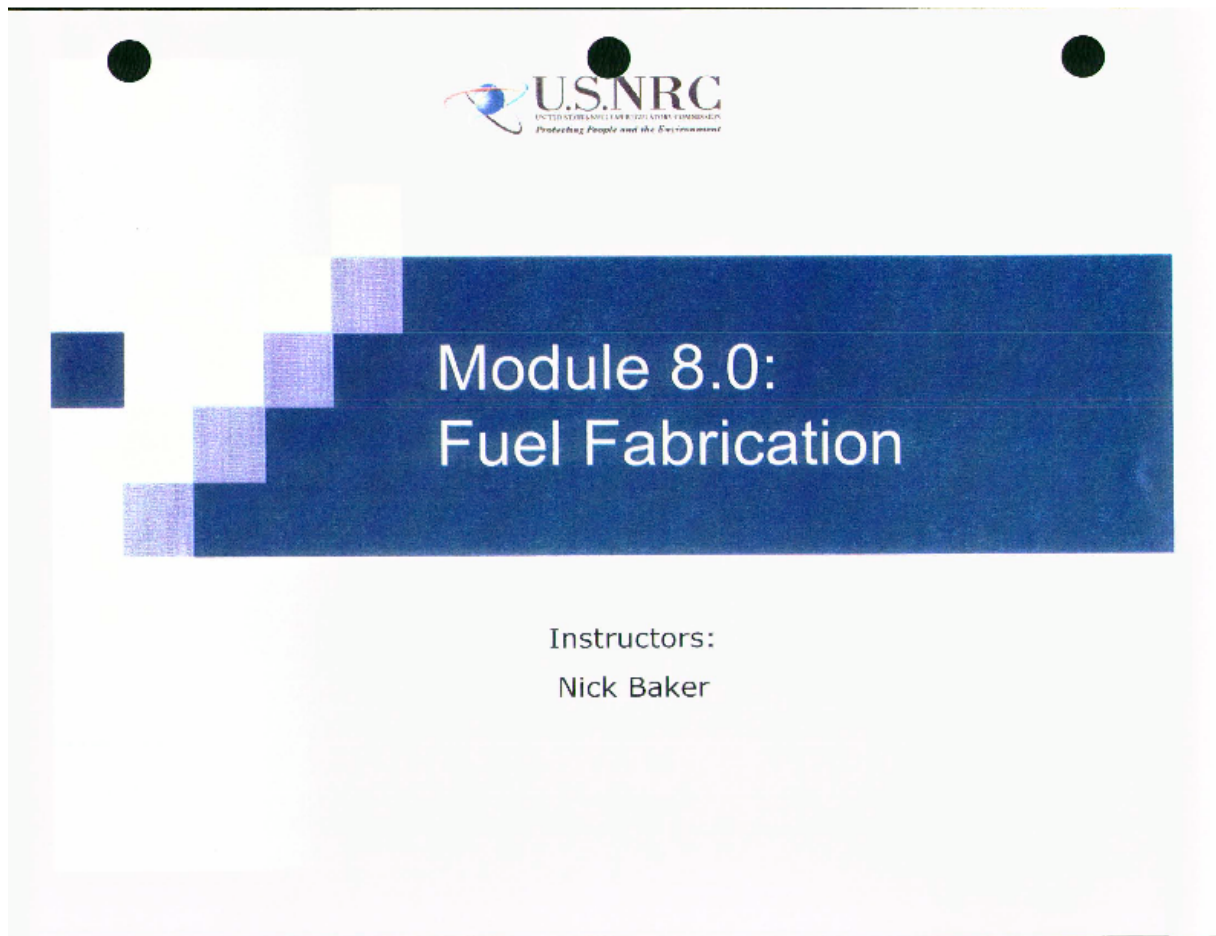
Module 7

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module7.pdf>



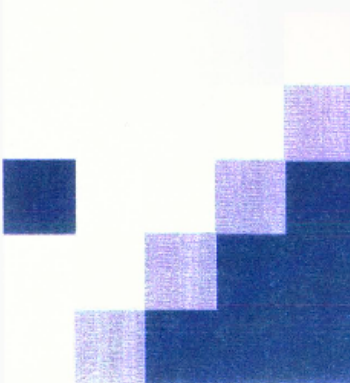
Module 8

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module8.pdf>



Module 9

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module9.pdf>

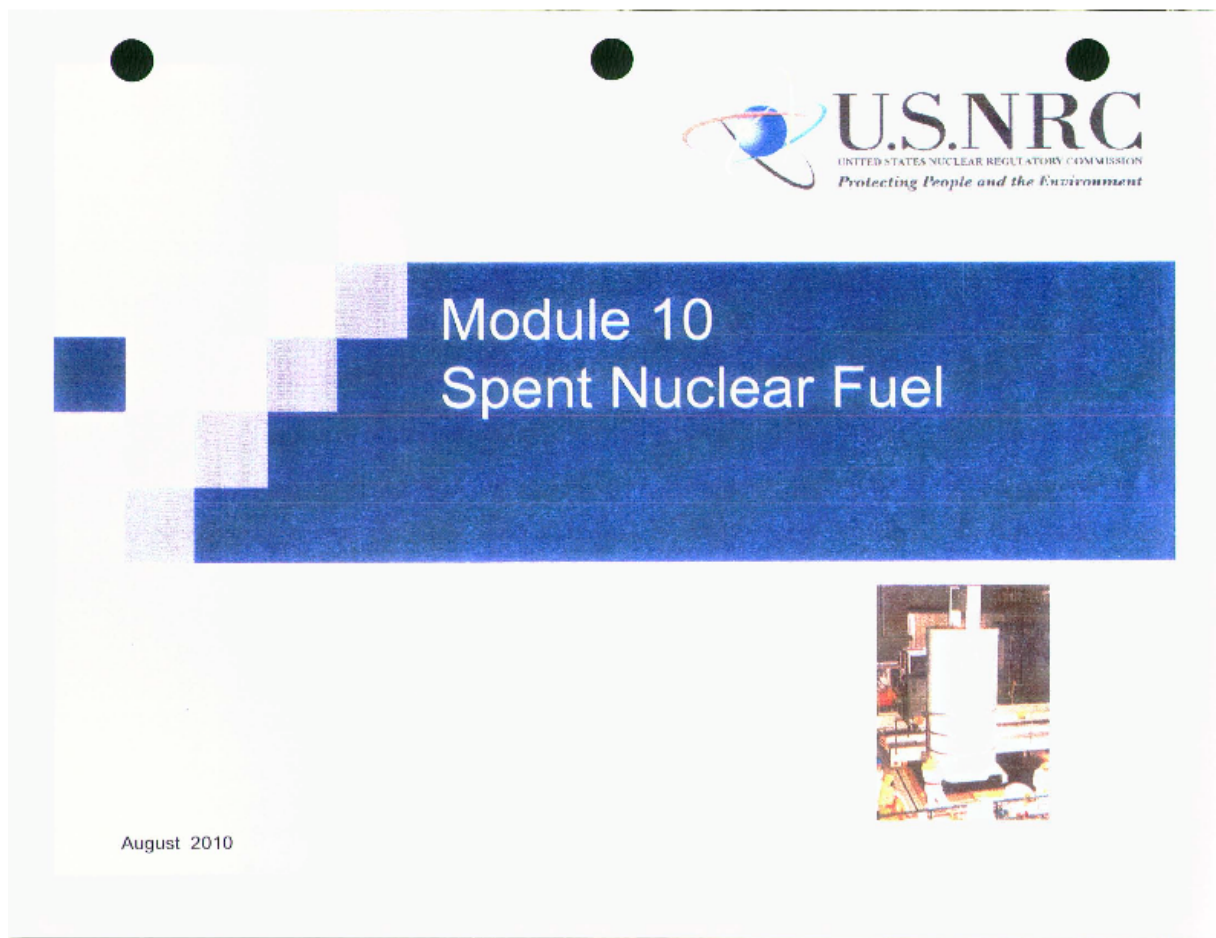


Module 9: Critical Mass Facilities

Instructor:
Christopher S. Tripp
301-492-3214
christopher.tripp@nrc.gov

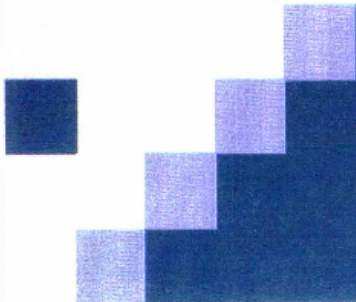
Module 10

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module10.pdf>



Module 11

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module11.pdf>



Module 11.1: Material Control and Accounting

Tom Grice
301-492-3131
Thomas.Grice@nrc.gov

Module 12

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module12.pdf>

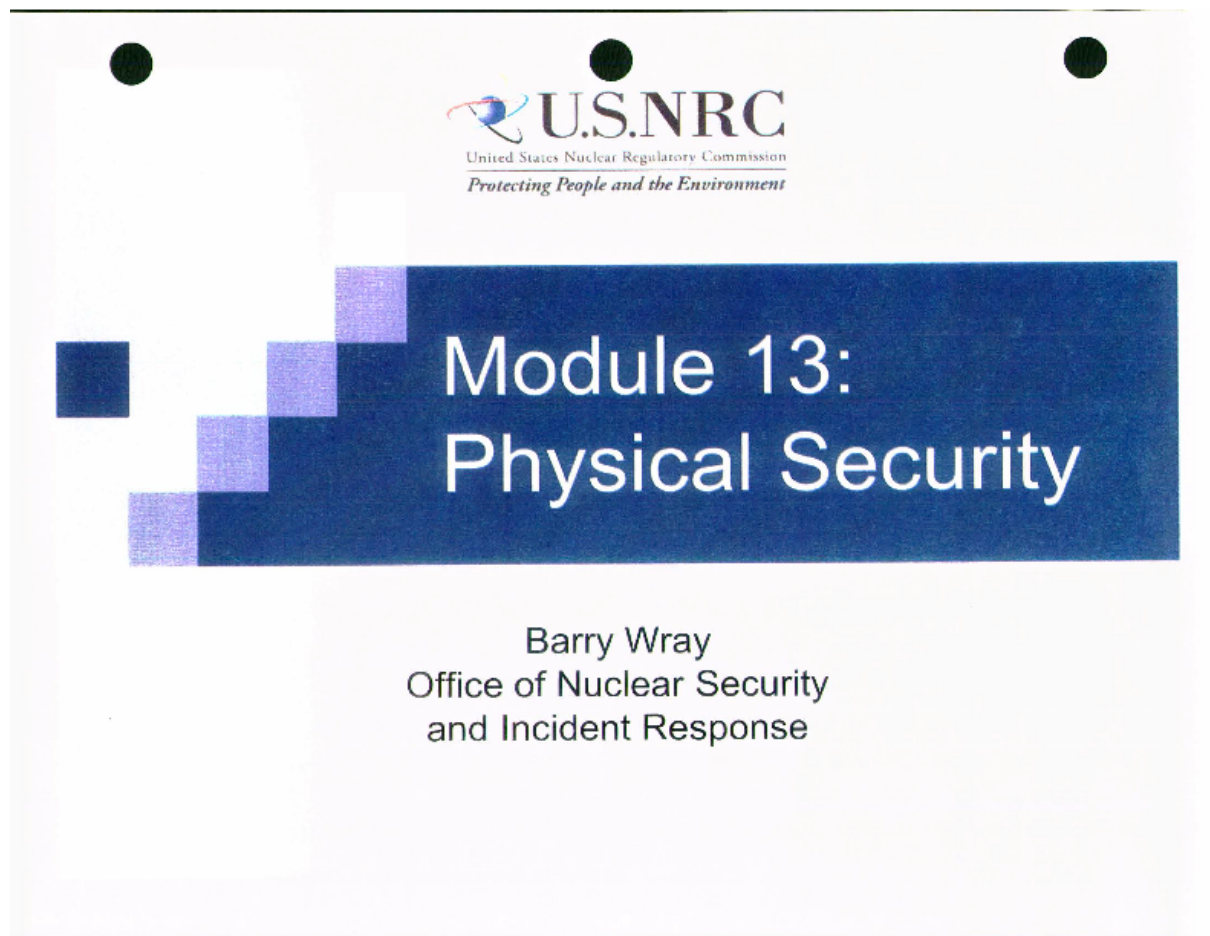


Module 12.0:
Fuel Cycle Accidents

Kevin Ramsey, FCSS
301-492-3123
Kevin.ramsey@nrc.gov

Module 13

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module13.pdf>



Module 14

<http://192.168.20.96/~boral/Boral/forum/src/yrt/FuelCycleProcess/NRCF201/module14.pdf>

