

فن آوری هسته ای

مبانی سیستم ها و کاربردها

تألیف : مجید رحمانی

سرشناسه	: رحمانی، مجید، ۱۳۵۶ -
عنوان و نام پدیدآور	: فن آوری هسته‌ای: مبانی، سیستم‌ها و کاربردها/تالیف مجید رحمانی؛ ویراستار علمی ولی‌الله طحانی.
مشخصات نشر	: اصفهان: کنکاش، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ظ، ۴۶۱ص: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۳۶-۱۹۷-۵
وضعیت فهرست نویسی	: فیا
یادداشت	: کتابنامه.
موضوع	: انرژی اتمی
موضوع	: سوخت‌های اتمی
موضوع	: اورانیوم — غنی‌سازی
شناسه افزوده	: طحانی، ولی‌الله، ویراستار
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ ۹۱۴۵/۳ TK
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۴۸
ساختار	: ۳۴۸۲۸۲۸



راهنمای نشر بزرگسالان ۱۳۹۰ و ناشر برگزیده ایمن سال ۱۳۸۸

فناوری هسته‌ای (مبانی، سیستم‌ها و کاربردها)	
تألیف: مجید رحمانی	
ناشر: انتشارات کنکاش	
ویراستار: ولی‌الله طحانی	
نوبت چاپ: اول	
تاریخ نشر: ۱۳۹۳	
تیراژ: ۱۰۰۰	
مدیر تولید: ...	
صفحه‌آرایی: ...	
طرح جلد: ایمان ...	
چاپ: کنکاش	
صحافی: پیمان	
قیمت: ۲۰۰۰۰ تومان	
شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۱۳۶-۱۹۷-۵	

اصفهان، سه راه حکیم نظامی، ابتدای خیابان ارتش، چاپ و نشر ...
تلفن: ۶۲۵۸۰۲۹ (۰۳۱۱)

به نام خدا

پیشگفتار

حمد و سپاس ایزد منان را که توفیق نگارش کتاب فن آوری هسته‌ای را به اینجانب عطا فرمود. محدودیت منابع انرژی فسیلی و آلودگی زیست محیطی این گونه انرژی‌ها که بحران‌ها و چالش‌های جدی را در سال‌های اخیر بوجود آورده است استفاده از سایر منابع انرژی از جمله انرژی‌های تجدیدپذیر و همچنین انرژی هسته‌ای را ضروری می‌سازد. گرم شدن کره زمین و تبعات آن از جمله خشکسالی‌ها تنها بخش کوچکی از مشکلات زیست محیطی انرژی‌های فسیلی است. از صرفی استفاده از سوخت‌های فسیلی به عنوان منبع انرژی کار نمی‌باشد چراکه از این مواد می‌توان استفاده بهتری را به عمل آورد. جهت بهره‌گیری از انرژی هسته‌ای به عنوان منبع انرژی پایدار، مطمئن و اقتصادی باید درک درستی از جایگاه این انرژی در بین سایر منابع انرژی، پتانسیل، معایب، مزایا و مسائل فنی و اقتصادی آن داشت. در این کتاب به این مسائل پرداخته می‌شود. در نگارش کتاب فن آوری هسته‌ای سعی شده است تمام نواقص کتاب‌های موجود در این زمینه تا حد امکان برطرف گردد و پیوستگی مطالب نیز حفظ شود. ویژگی اصلی این کتاب سادگی، شیوایی و کاربردی بودن آن است.

مطالعه این کتاب به کارکنان مراکز هسته‌ای، دانشجویان مهندسی هسته‌ای، فیزیک هسته‌ای و غیره پیشنهاد می‌گردد. سادگی و شیوایی مطالب این کتاب اجازه می‌دهد تا برای کسانی که آشنایی کلی با شیمی و فیزیک پایه دارند از جمله کسانی که دوره متوسطه تحصیلی را به اتمام رسانده‌اند قابل استفاده و بسیار مفید باشد. بر خود لازم می‌دانم از آقای مهندس ولی‌اله طحانی که ویراستاری این کتاب را بر عهده داشتند و همچنین از آقای مهندس اکبر احمدی به خاطر راهنمایی‌های صمیمانه‌شان تشکر نموده باشم.

مجید رحمانی

تیرماه ۱۳۹۱

فهرست

۱	فصل ۱: مبانی فیزیک هسته ای
۱	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- شکل و ساختار اتم
۴	۳-۱- عدد اتمی و عدد جرمی
۵	۴-۱- ایزوتوپ ها و ایزوبارها
۶	۵-۱- واحدها در فیزیک هسته ای
۶	۱-۵-۱- بار الکتریکی
۶	۲-۵-۱- بار مغناطیسی
۷	۳-۵-۱- عدد آووگادرو
۸	۴-۵-۱- جرم اتمی و عدد جرمی
۸	۱-۵-۵- انرژی
۹	۶-۱- هم ارزی ماده و انرژی
۱۰	۷-۱- انرژی پیوندی
۱۳	فصل ۲: مواد رادیواکتیو به عنوان منابع انرژی گرمایی
۱۳	۱-۲- تاریخچه
۱۶	۲-۲- نیمه عمر عناصر رادیواکتیو
۱۸	۳-۲- مشخصات عناصر پایدار و رادیواکتیو
۲۰	۴-۲- اکتیویته یا پرتوزایی
۲۰	۵-۲- محصولات ناشی از واپاشی عناصر
۲۱	۲-۵-۱- واپاشی α (آلفا)
۲۱	۲-۵-۲- واپاشی β (بتا)
۲۳	۲-۵-۳- واپاشی γ (گاما)
۲۴	۶-۲- قوانین پایستگی و فرایندهای رادیواکتیو γ
۲۵	۷-۲- منشاء و مقدار انرژی حاصل از واپاشی هسته ها
۲۷	۸-۲- برخورد ذرات حاصل از واپاشی با مواد مختلف
۲۷	۱-۸-۲- برخورد کشسان (الاستیک)
۲۸	۲-۸-۲- برخورد غیر کشسان (غیرالاستیک)

۲۹	 ۲-۸-۳- گیراندازی نوترون
۳۰	 ۲-۸-۴- شکافت هسته‌ای
۳۲	 ۲-۹- زنجیره واپاشی
۳۵	 فصل ۳: شکافت هسته‌ای
۳۵	 ۳-۱- مقدمه
۳۶	 ۳-۲- مکانیزم پدیده شکافت
۳۷	 ۳-۳- انرژی جداسازی و شکافت پذیری
۴۰	 ۳-۴- سطح مقطع شکافت برای نوترون‌های گرمایی و سریع
۴۲	 ۳-۵- محصولات یا پاره‌های شکافت
۴۴	 ۳-۶- تعداد نوترون‌های آزاد شده در نتیجه شکافت
۴۵	 ۳-۷- انرژی نوترون‌های حاصل از شکافت هسته‌ای
۴۶	 ۳-۸- واپاشی پاره‌های شکافت
۴۶	 ۳-۸-۱- شکافت آلفا
۴۷	 ۳-۸-۲- واپاشی بتا
۴۸	 ۳-۹- انرژی حاصل از شکافت
۴۹	 ۳-۱۰- واکنش زنجیره‌ای
۵۱	 فصل ۴: مفاهیم فیزیکی راکتورها، هسته‌ای
۵۱	 ۴-۱- مقدمه
۵۲	 ۴-۲- واکنش زنجیره‌ای
۵۴	 ۴-۳- جرم بحرانی
۵۵	 ۴-۴- ایجاد واکنش زنجیره‌ای
۵۷	 ۴-۵- تبدیل نوترون‌های پر انرژی به نوترون‌های گرمایی
۵۹	 ۴-۵-۱- نرخ کند سازی
۶۰	 ۴-۵-۲- مقایسه ارزش کیفی کند کننده‌های مختلف
۶۲	 ۴-۶- تعداد نوترون‌های موجود آمده به ازای هر نوترون جذب شده
۶۴	 ۴-۷- ضریب تکثیر و پارامترهای تاثیر گذار در آن
۶۷	 ۴-۸- واکنش پذیری یا راکتیویته
۶۸	 ۴-۹- کنترل کننده‌ها
۶۹	 ۴-۱۰- سمی شدن راکتورها و مسمومیت زنون

۷۱	فصل ۵: راکتورهای هسته‌ای
۷۱	۱-۵- مقدمه
۷۲	۲-۵- اجزاء مختلف یک راکتور هسته‌ای
۷۲	۱-۲-۵ سوخت هسته‌ای و غلاف آن
۷۳	۲-۲-۵ کندکننده
۷۳	۳-۲-۵ خنک کننده
۷۴	۴-۲-۵ کنترل کننده
۷۵	۳-۵ توان و بازده راکتورهای هسته‌ای
۷۶	۴-۵ راکتورهای هسته‌ای
۷۸	۵-۵ تاریخچه راکتورهای هسته‌ای
۷۸	۱-۵ راکتور فرمی اولین راکتور هسته‌ای
۸۰	۵-۵-۲ سوخت راکتورهای تجاری قدرت
۸۳	۶-۵ راکتورهای هسته‌ای
۸۳	۱-۶-۵ راکتورهای آب سبک
۸۴	۲-۶-۵ راکتورهای آب بوشان
۸۸	۳-۶-۵ راکتورهای آب سنگین
۹۲	۴-۶-۵ راکتورهای آب سنگین تحت فشار
۹۷	۵-۶-۵ VVER راکتورهای
۹۷	۶-۶-۵ RBMK یا LGR راکتورهای
۹۸	۷-۶-۵ LMFBF راکتورهای
۹۸	۸-۶-۵ HWLWR راکتورهای
۹۹	۹-۶-۵ GCR راکتورهای خنک شونده با گاز
۱۰۱	۱۰-۶-۵ ATR راکتورهای
۱۰۱	۱۱-۶-۵ HTGR راکتورهای
۱۰۵	۱۲-۶-۵ نیروگاه هسته‌ای بوشهر
۱۰۹	۷-۵ راکتورهای آینده
۱۱۲	۸-۵ راکتورهای همجوشی
۱۱۳	۹-۵ راکتور طبیعی اکتو

۱۱۵	فصل ۶: راکتورهای سریع زاینده
۱۱۵	۱-۶- مقدمه
۱۱۶	۲-۶- اصول کار راکتورهای سریع زاینده
۱۱۸	۳-۶- مفاهیم فیزیکی راکتورهای زاینده
۱۱۸	۴-۳-۱- راکتورهای سوزاننده، مبدل و زاینده
۱۱۸	۴-۳-۲- مشکلات رسیدن به نرخ تبدیل برابر واحد در راکتورهای هسته‌ای
۱۱۹	۴-۳-۳- پتانسیل اورانیوم ۲۳۳ برای راکتور زاینده گرمایی
۱۱۹	۴-۳-۴- دستیابی به ضریب تبدیل بالا بدون زاینده‌گی
۱۲۰	۴-۳-۵- راکتورهای سریع زاینده
۱۲۰	۴-۳-۱- پلوتونیم به عنوان سوخت در راکتورهای زاینده
۱۲۳	۴-۳-۲- ویژگی‌های فنی راکتورهای سریع زاینده
۱۲۵	۴-۳-۳- انواع راکتورهای زاینده و پارامترهای مهم در طراحی
۱۲۹	۴-۳-۴- تولید پلوتونیم در راکتورهای هسته‌ای
۱۳۳	فصل ۷: مصرف سوخت راکتورهای هسته‌ای
۱۳۳	۱-۷- سوخت و ساز معیاری- سوخت سوخت
۱۳۴	۲-۷- مقدار سوخت و ساز در راکتورهای هسته‌ای
۱۳۵	۳-۷- مقدار انرژی آزاد شده در اثر شکافت اتم اورانیوم ۲۳۵
۱۳۶	۴-۷- مقدار انرژی آزاد شده به ازای واحد گرم سوخت
۱۳۸	۵-۷- میزان اورانیوم خام مورد نیاز در راکتورهای هسته‌ای
۱۳۸	۶-۷- میزان ذخایر اورانیوم
۱۳۸	۷-۶-۱- ذخایر مرسوم
۱۴۰	۷-۶-۲- ذخایر ثانویه
۱۴۱	۷-۶-۳- ذخایر غیر مرسوم
۱۴۱	۷-۶-۴- تاثیر پیشرفت تکنولوژی بر روی تکنولوژی چرخه سوخت
۱۴۳	فصل ۸: گداخت یا همجوشی هسته‌ای
۱۴۳	۱-۸- مقدمه
۱۴۴	۲-۸- شرایط لازم برای ایجاد همجوشی هسته‌ای
۱۴۶	۳-۸- واکنش‌های مهم در همجوشی هسته‌ای

۱۴۸	 ۴-۸- بازده و یا بهره انرژی
۱۴۹	 ۵-۸- راکتورهای همجوشی
۱۴۹	 ۱-۵-۸- محصورسازی مغناطیسی
۱۵۲	 ۲-۵-۸- محصورسازی جرمی (لختی)
۱۵۷	 فصل ۹: چرخه سوخت هسته ای
۱۵۷	 ۱-۹- مقدمه
۱۵۹	 ۲-۹- اکتشاف ذخایر اورانیوم
۱۶۴	 ۳-۹- معدن کاری اورانیوم
۱۶۵	 ۴-۹- کانه آری سنگ معدن اورانیوم
۱۶۶	 ۱-۹-۱- استفاده از روش های مرسوم برای تولید کنسانتره اورانیوم (کیک زرد) ...
۱۷۲	 ۴-۹-۲- روش های استخراج و توده ای
۱۷۴	 ۳-۴-۹- سایر روش های کانه آری اورانیوم
۱۷۵	 ۴-۴-۹- سایر منابع اورانیوم
۱۷۷	 ۵-۹- پالایش و فرآوری اورانیوم
۱۷۹	 ۱-۵-۹- تولید هگزافلوراید اورانیم UF_6
۱۸۵	 ۲-۵-۹- جمع آوری و ذخیره سازی UF_6
۱۸۷	 ۳-۵-۹- تأسیسات فرآوری اورانیوم ایران
۱۸۸	 ۴-۵-۹- تبدیل UF_6 غنی شده و یا تهی شده پودر UO_2 با درجه سرامیکی (عملیات واگردانی)
۱۹۲	 ۵-۵-۹- سوخت های فلزی
۱۹۴	 ۶-۹- شکل دهی و مونتاژ سوخت
۱۹۵	 ۱-۶-۹- ساخت میلدها و مجتمع سوخت
۱۹۸	 ۲-۶-۹- انواع دیگر سوخت
۱۹۹	 ۷-۹- اورانیوم تهی شده
۲۰۰	 ۸-۹- غنی سازی اورانیوم
۲۰۲	 ۱-۸-۹- تنوری جداسازی ایزوتوپ ها
۲۰۸	 ۲-۸-۹- غنی سازی با استفاده از روش دیفیوژن گازی
۲۱۱	 ۳-۸-۹- سانتریفیوژ گازی

۲۱۹	 ۹-۸-۴- آبشارهای غنی سازی
۲۲۳	 ۹-۸-۵- روش جدایش الکترومغناطیسی (EMIS)
۲۲۵	 ۹-۸-۶- دیفیوژن گرمایی
۲۲۶	 ۹-۸-۷- جداسازی به روش لیزر
۲۳۱	 ۹-۸-۸- روش های شیمیایی
۲۳۱	 ۹-۹- آب سنگین
۲۳۱	 ۹-۹-۱- ویژگی های آب سنگین
۲۳۲	 ۹-۹-۲- تولید آب سنگین
۲۴۰	 ۹-۹-۳- ر عقیبی چرخه سوخت
۲۴۱	 ۹-۹-۴- دفع و یا ذخیره سازی سوخت مصرف شده
۲۴۱	 ۹-۹-۵- فرآیند سوخت مصرف شده
۲۴۳	 ۹-۹-۶- فرآیند های آبی
۲۴۷	 ۹-۱۳-۳- تولید سوخت غیرآبی
۲۴۸	 ۹-۱۳- وضعیت بازار سوخت در جهان
۲۵۳	فصل ۱۰: ایمنی هسته ای
۲۵۳	 ۱۰-۱- مقدمه
۲۵۳	 ۱۰-۲- عناصر اساسی ایمنی هسته ای
۲۵۴	 ۱۰-۳-۱- مکان یابی مراکز هسته ای
۲۵۴	 ۱۰-۳-۲- ساخت و تولید با کیفیت بالا
۲۵۵	 ۱۰-۳-۳- فرهنگ ایمنی
۲۵۵	 ۱۰-۳- سطوح حفاظتی در تاسیسات هسته ای
۲۵۶	 ۱۰-۴- ایمنی در نیروگاه های هسته ای
۲۵۹	 ۱۰-۵- درخت های وقایع و ارزیابی ریسک
۲۶۴	 ۱۰-۶- ریسک های مربوط به فعالیت عادی نیروگاه ها
۲۶۴	 ۱۰-۷- ارزیابی ایمنی احتمالی
۲۶۵	 ۱۰-۸- عوامل موثر در بالا بردن ایمنی هسته ای
۲۶۵	 ۱۰-۹- نقش سازمان های مرکزی در توسعه ایمنی هسته ای
۲۶۶	 ۱۰-۱۰- وضعیت ایمنی در نیروگاه های هسته ای جهان

۲۶۷	۱۰-۱۱- حوادث هسته ای
۲۶۸	۱۰-۱۱-۱- حادثه تری مایل آیلند
۲۷۱	۱۰-۱۱-۲- حادثه چرنوبیل
۲۷۵	۱۰-۱۱-۳- حادثه فوکوشیما
۲۷۷	فصل ۱۱: حفاظت در برابر پرتوها
۲۷۷	۱۱-۱- مقدمه
۲۷۷	۱۱-۲- انواع پرتوها
۲۷۹	۱۱-۳- منبع تابش
۲۷۹	۱۱-۳-۱- پرتوهای طبیعی
۲۸۰	۱۱-۳-۲- پرتوهای مصنوعی
۲۸۰	۱۱-۴- سطح برگشت
۲۸۰	۱۱-۵- کمیابی و تشخیص
۲۸۴	۱۱-۶- اثرات بیولوژیکی پرتوها
۲۸۵	۱۱-۷- پرتوگیری با دزهای بالا
۲۸۸	۱۱-۸- پرتوگیری با دزهای پایین
۲۸۹	۱۱-۹- انواع پرتوگیری و روش های محدودسازی آن
۲۸۹	۱۱-۹-۱- پرتوگیری خارجی
۲۹۰	۱۱-۹-۲- پرتوگیری داخلی
۲۹۱	۱۱-۱۰- پرتوهای غیر یون ساز
۲۹۲	فصل ۱۲: مدیریت پسماندهای هسته ای
۲۹۳	۱۲-۱- مقدمه
۲۹۳	۱۲-۲- انواع پسماندهای هسته ای
۲۹۴	۱۲-۲-۱- پسماندهای با سطح بسیار پایین VLLW
۲۹۴	۱۲-۲-۲- پسماندهای سطح پایین LLW
۲۹۴	۱۲-۲-۳- پسماندهای سطح میانی ILW
۲۹۵	۱۲-۲-۴- پسماندهای هسته ای سطح بالا HLW
۲۹۵	۱۲-۳- حجم پسماندهای تولید شده در صنایع هسته ای
۲۹۸	۱۲-۴- اصول مدیریت پسماندها

۲۹۸	۱۲-۴-۱- مدیریت پسماندهای LLW و ILW
۳۰۱	۱۲-۴-۲- مدیریت پسماندهای سطح بالا HLW
۳۱۴	۱۲-۵- حمل و نقل و جابجایی پسماندهای هسته‌ای
۳۱۴	۱۲-۶- سند ایمنی
۳۱۵	۱۲-۷- دفع پسماندها در چرخه سوخت هسته‌ای
۳۱۷	۱۲-۸- از رده خارج کردن تاسیسات هسته‌ای
۳۲۱	فصل ۱۳: اقتصاد انرژی
۳۲۱	۱۳-۱- مقدمه
۳۲۱	۱۳-۲- هزینه‌های خارجی و هزینه‌های داخلی در نیروگاه‌ها
۳۲۴	۱۳-۳- هزینه تولید برق به روش برق هسته‌ای
۳۲۴	۱۳-۱۱- هزینه تولید سوخت هسته‌ای
۳۳۰	۱۳-۱۲- هزینه ساخت نیروگاه‌های هسته‌ای
۳۳۱	۱۳-۱۳- زمان ساخت و عمر نیروگاه‌های هسته‌ای
۳۳۲	۱۳-۳-۴- هزینه‌های ایمنی، تعمیر و نگهداری در نیروگاه‌های هسته‌ای
۳۳۲	۱۳-۳-۵- هزینه از رده خارج کردن نیروگاه
۳۳۴	۱۳-۴- مقایسه هزینه تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه‌های مختلف
۳۴۲	۱۳-۵- برآورد هزینه انرژی الکتریکی تولید شده توسط نیروگاه‌های مختلف توسط چند نهاد بین‌المللی دیگر
۳۴۷	فصل ۱۴: سلاح‌های هسته‌ای
۳۴۷	۱۴-۱- مقدمه
۳۴۸	۱۴-۲- تاریخچه سلاح‌های هسته‌ای
۳۵۰	۱۴-۳- مواد مورد استفاده در سلاح‌های هسته‌ای
۳۵۲	۱۴-۴- محاسبه میزان مواد شکافت پذیر در سلاح‌های هسته‌ای
۳۵۳	۱۴-۵- محاسبه زمان لازم برای انفجار سلاح هسته‌ای
۳۵۴	۱۴-۶- سلاح‌های شکافتی
۳۵۷	۱۴-۶-۱- سلاح‌های نوع تفنگی
۳۵۹	۱۴-۶-۲- استفاده از پلوتونیم در سلاح‌های هسته‌ای
۳۶۳	۱۴-۶-۳- بمب‌های نوع انفجار داخلی

۳۶۵	 ۴-۶-۱۴- تولید پلوتونیم در راکتورهای هسته‌ای.
۳۶۷	 ۵-۶-۱۴- مشکلات موجود در استفاده از پلوتونیم با درجه راکتور
۳۶۹	 ۷-۱۴- سلاح‌های تقویت شده
۳۶۹	 ۸-۱۴- سلاح‌های هسته‌ای تقویت کننده پرتو X و نوترون
۳۷۰	 ۹-۱۴- سلاح‌های گداختی
۳۷۴	 ۱۰-۱۴- مسائل ایمنی مربوط به ساخت سلاح‌های هسته‌ای
۳۷۴	 ۱۱-۱۴- اثرات سلاح‌های هسته‌ای
۳۷۵	 ۱-۱۱-۱۴- انفجارهای هوایی
۳۷۶	 ۲-۱۱-۱۴- انفجارهای زمینی
۳۷۶	 ۳-۱۱-۱۴- انفجارهای زیرزمینی
۳۷۶	 ۴-۱۱-۱۴- انفجار در ارتفاع‌های خیلی زیاد
۳۷۹	 ۱-۱۴- اثرات فیزیکی از موج انفجار در سلاح‌های هسته‌ای
۳۸۱	 ۶-۱۱-۱۴- اثرات فیزیکی از تابش‌های گرمایی سلاح‌های هسته‌ای
۳۸۴	 ۷-۱۱-۱۴- اثرات تابشی شعاع‌های هسته‌ای سلاح‌های هسته‌ای
۳۸۸	 ۱۲-۱۴- معاهده منع گسترش سلاح‌های هسته‌ای
۳۹۳	 فصل ۱۵: انرژی هسته‌ای و محیط زیست
۳۹۳	 ۱-۱۵- گرم شدن کره زمین
۳۹۶	 ۲-۱۵- خطرات گرم شدن کره زمین
۳۹۷	 ۳-۱۵- ارزش تولیدی، حرارتی و زیست محیطی انرژی هسته‌ای
۳۹۸	 ۴-۱۵- مقدار دی‌اکسیدکربن منتشر شده در جو زمین
۳۹۹	 ۵-۱۵- روش‌های مختلف کاهش گازهای گلخانه‌ای
۴۰۱	 ۶-۱۵- بررسی سایر نیروگاه‌ها و منابع انرژی جایگزین
۴۰۲	 ۷-۱۵- مشکلات زیست محیطی مربوط به نیروگاه‌های هسته‌ای
۴۰۵	 فصل ۱۶: آینده انرژی هسته‌ای
۴۰۵	 ۱-۱۶- مقدمه
۴۰۶	 ۲-۱۶- راکتورهای هسته‌ای جهان
۴۱۰	 ۳-۱۶- مشکلات موجود در توسعه انرژی هسته‌ای
۴۱۰	 ۱-۳-۱۶- مسائل اقتصادی

۴۱۰	 ۱۶-۳-۲- میزان ذخایر اورانیوم
۴۱۱	 ۱۶-۳-۳- زیاده های هسته ای
۴۱۲	 ۱۶-۳-۴- تکثیر سلاح های هسته ای
۴۱۲	 ۱۶-۳-۵- ایمنی نیروگاه های هسته ای
۴۱۳	 ۱۶-۴-۱- انرژی هسته ای و سیاست های بیت المللی
۴۱۳	 ۱۶-۴-۱- سیاست انرژی هسته ای در آلمان
۴۱۵	 ۱۶-۴-۲- سیاست انرژی هسته ای در فرانسه
۴۱۷	 ۱۶-۴-۳- سیاست انرژی هسته ای در آمریکا
۴۱۷	 ۱۶-۴-۴- کاربردهای دیگر انرژی هسته ای
۴۱۸	 ۱۶-۵-۱- تولید هیدروژن
۴۱۸	 ۱۶-۵-۲- شیرین کردن آب دریا
۴۱۹	 ۱۶-۵-۳- تولید ماه
۴۱۹	 ۱۶-۵-۴- کاربرد ها و کاربردها در پزشکی، کشاورزی و صنعت
۴۲۲	 پیوست الف : تبدیل و ایزوتوپ های ضایع تبدیل
۴۲۴	 پیوست ب : پیشوند یکاها در سیستم بین المللی
۴۲۵	 پیوست ج : اکرونیم
۴۲۹	 پیوست د : واژه نامه انگلیسی- فارسی
۴۴۳	 پیوست ه : جدول تناوبی عناصر

گاه شمار هسته‌ای

- ۱۸۹۶ آزمایش‌های آنتونی هنری بکرل با اورانیوم منجر به کشف پدیده رادیواکتیویته شد.
- ۱۸۹۷ ماری کوری و پیرکوری عناصر رادیواکتیو پلونیوم و رادیم را کشف کردند.
- ۱۹۰۲ ارنست رادرفورد و فردریک سودی پی بردند که رادیواکتیویته فرآیندی است که در آن اتم‌های یک عنصر به طور ناگهانی دچار واپاشی شده و به عناصر دیگر تبدیل می‌شوند.
- ۱۹۰۵ آلبرت انیشتین تئوری نسبیت و رابطه هم‌ارزی جرم و انرژی را انتشار داد. این رابطه علت اینکه چرا پدیده شکافت باعث تولید مقدار زیادی انرژی می‌شود را تشریح کرد.
- ۱۹۰۷ استنلی اولین پرتودرمانی را با رادیم انجام داد و سرطان پوست را درمان کرد.
- ۱۹۱۳ ویلز رمانی را که در آن از انرژی هسته‌ای در جنگ استفاده شده بود انتشار داد. در این سال نیز اولین مدل اتمی خود را که با سایر همکاران خود متفاوت بود پیشنهاد کرد.
- ۱۹۱۳ یلینسکی نشان داد که هسته اتمی به وسیله الکترون‌ها در اوربیتال‌های (مدارها) ثابت در مدار می‌چرخد.
- ۱۹۲۱ اتوهان ایزنبرگر هسته‌ای را کشف کرد.
- ۱۹۳۲ چادویک نوترون را کشف کرد.
- ۱۹۳۴ انریکو فرمی بر روی هسته‌های مصنوعی نیتونیوم، اورانیوم را با نوترون بمباران نمود.
- ۱۹۳۸ اتوهان و فریتز استراسن با اورانیوم را با نوترون بمباران کرده و عناصر باریم و کریپتون را تولید کردند. این آزمایش منجر به کشف پدیده شکافت هسته‌ای شد.
- ۱۹۴۰ دانشمندان در کشورهای مختلف نشان دادند که اورانیوم ۲۳۵ با نوترون‌های کند و توریم ۲۳۲ و اورانیوم ۲۳۸ تنها با نوترون‌های تند شکافته شده و در اثر شکافت ۲ تا ۳ نوترون به همراه مقدار زیادی انرژی آزاد می‌شود. بنابراین امکان تولید سلاح هسته‌ای و ساخت نیروگاه هسته‌ای وجود دارد.
- ۱۹۴۱ سی برگه کندی و وال در دانشگاه کالیفرنیا عناصر رادواورانیوم مانند نیتونیوم و پلوتونیوم را تولید نمودند و به همراه سگ‌ها کشف کردند که پلوتونیوم شکافت‌پذیر است.
- ۱۹۴۲ فرانکلین روزولت رئیس‌جمهور آمریکا پروژه مانهاتان برای ساخت سلاح هسته‌ای را تصویب نمود. در این سال اولین واکنش زنجیره‌ای توسط انریکو فرمی در دستگاه شیکاگو با موفقیت انجام شد.
- ۱۹۴۵ اولین بمب هسته‌ای در آلامادرو نیومکزیکو که با پلوتونیوم ساخته شده بود آزمایش شد. سپس شهر هیروشیما با استفاده از بمب اورانیومی و ۳ روز بعد ناگازاکی با استفاده از بمب پلوتونیومی توسط آمریکا بمباران شد. در این حادثه بیش از ۲۰۰ هزار نفر جان خود را از دست دادند.
- ۱۹۵۱ راکتور آزمایشی زاینده ۱ که اولین برق هسته‌ای را تولید نمود در آرکو آیداهو به بهره‌برداری رسید.
- ۱۹۵۲ اولین بمب گرما هسته‌ای (هیدروژنی) توسط آمریکا آزمایش شد.
- ۱۹۵۳ آیزنهاور رئیس‌جمهور آمریکا برای تغییر وجه بین‌المللی این کشور پیشنهاد اتم برای صلح

را ارائه نمود. او پیشنهاد نمود توسعه تکنولوژی هسته ای در جهت اهداف صلح آمیز باشد.	
شوروی ساخت راکتور هسته ای ابنینسک را که اولین نیروگاه هسته ای جهت تولید برق بود شروع کرد. توان این نیروگاه ۵ MWe بود.	۱۹۵۴
برق شهر آرکو آیداهو با جمعیت ۱۰۰۰ نفر توسط راکتور بوراکس ۳ که یک راکتور آب جوشان بود تأمین شد. در این سال اولین زیردریایی با پیش رانش هسته ای (زیردریایی ناتیلوس) شروع به کار کرد.	۱۹۵۵
اولین راکتور تجاری هسته ای در کالدرهال انگلیس با توان ۴۵ MWe به بهره برداری رسید.	۱۹۵۶
راکتور هسته ای شپینگپورت، اولین راکتور هسته ای آمریکا در پنسیلوانیا به بهره برداری رسید.	۱۹۵۷
اولین راکتور کندو به بهره برداری رسید.	۱۹۶۲
راکتور المان AVR به بهره برداری رسید.	۱۹۶۶
راکتورهای سریع زاینده فنیکیس که خنک کننده آن سدیم مایع بود در فرانسه به بهره برداری رسید.	۱۹۷۳
حادثه هسته ای فوشی مارا آتلند رخ داد.	۱۹۷۹
حادثه اتمی چرنوبیل رخ داد.	۱۹۸۶
راکتور AVR در آلمان متوقف شد.	۱۹۸۸
ژاپن ساخت راکتورهای آب جوشان به سرفته تحت عنوان راکتورهای نسل ۳ را آغاز کرد.	۱۹۹۱
اولین راکتور تجاری چین تحت عنوان کینشان ۱ وارد مدار تولید برق شد.	۱۹۹۳
شرکت اسکوم آفریقای جنوبی جهت ساخت راکتورهای AVR تأسیس شد.	۲۰۰۰
فنلاند ساخت راکتورهای پیشرفته آب تحت فشار نسل ۳ را آغاز کرد.	۲۰۰۲
حادثه هسته ای فوکوشیما اتفاق افتاد.	۲۰۱۱