

IRIS – NAPREDNI INTEGRALNI NUKLEARNI REAKTOR MODULARNE IZVEDBE

Prof. dr. sc. Nikola Čavlića, doc. dr. sc. Davor Grgić, prof. dr. sc. Dubravko Pevec – Zagreb
dr. sc. Mario Carelli, dr. sc. Bojan Petrović, Pittsburgh, SAD

UDK 621.039.5
PREGLEDNI ČLANAK

Glavne značajke reaktora IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) date su u ovom članku. IRIS je integralni, modularni, lakovodni reaktor srednje snage (335 MWe). Projekt reaktora IRIS razvija međunarodni konzorcij od dvadesetak organizacija iz deset zemalja predvođenih kompanijom Westinghouse. Primarni cilj projekta je razviti siguran, pouzdan i ekonomičan reaktor male do srednje snage. U članku je opisana integralna reaktorska posuda koja osim jezgre reaktora, moderatora, kontrolnih šipki i reflektora neutrona sadrži parogeneratore, reaktorske pumpe, mehanizme kontrolnih šipki i tlačnik. Jedinstvene sigurnosne karakteristike („safety-by-design“) omogućile su manje i jednostavnije pasivne sigurnosne sustave. Poboljšana sigurnost i pouzdanost, ekonomičnost, te mogućnost postupne izgradnje novih kapaciteta uz relativno male investicije čine IRIS naročito privlačnim za manje elektroenergetske sustave.

Ključne riječi: IRIS, modularnost, integralni nuklearni reaktor, poboljšana sigurnost, ekonomičnost.

1. UVOD

Tijekom pedesetak godina miroljubivog korištenja električne energije akumulirano je iskustvo veće od deset tisuća reaktorskih godina rada nuklearnih elektrana. Krajem 2003. u svijetu je bilo u pogonu 438 reaktora, u 31 zemlji, s ukupnom instaliranom snagom od 366 GWe, koji su proizvodili približno petinu ukupne svjetske proizvodnje električne energije. Više od 40 nuklearnih elektrana je u izgradnji ili je naručeno u više od deset zemalja [1].

Porast interesa za nuklearnom energijom uzrokovan je povećanom potražnjom energije, rastom cijena nafte [2], kao i svjetskom zabrinutošću zbog pretjerane emisije stakleničkih plinova čemu doprinose elektrane na fosilna goriva.

Zadnjih godina intenzivno se radi na razvoju novih reaktorskih sustava. Procijenjeno je da će nuklearna energija imati vrlo značajnu ulogu u zadovoljenju budućih svjetskih potreba za energijom te da nuklearne elektrane mogu osigurati dugoročnu i ekonomičnu opskrbu električne energije. Poštivanje sve strožih zahtjeva na sigurnost nuklearnih elektrana preduvjet je prihvata ove tehnologije.

U SAD-u, ustanova američke vlade *Department of Energy* (DOE) pokreće inicijativu za razvoj novih reaktora koji bi ušli u pogon iza 2030. godine. Te bi nuklearne elektrane trebale odgovoriti energetske izazovima 21. stoljeća i one su svrstane u četvrtu generaciju nuklearnih elektrana [3]. Na slici 1 vidi se podjela svih nuklearnih

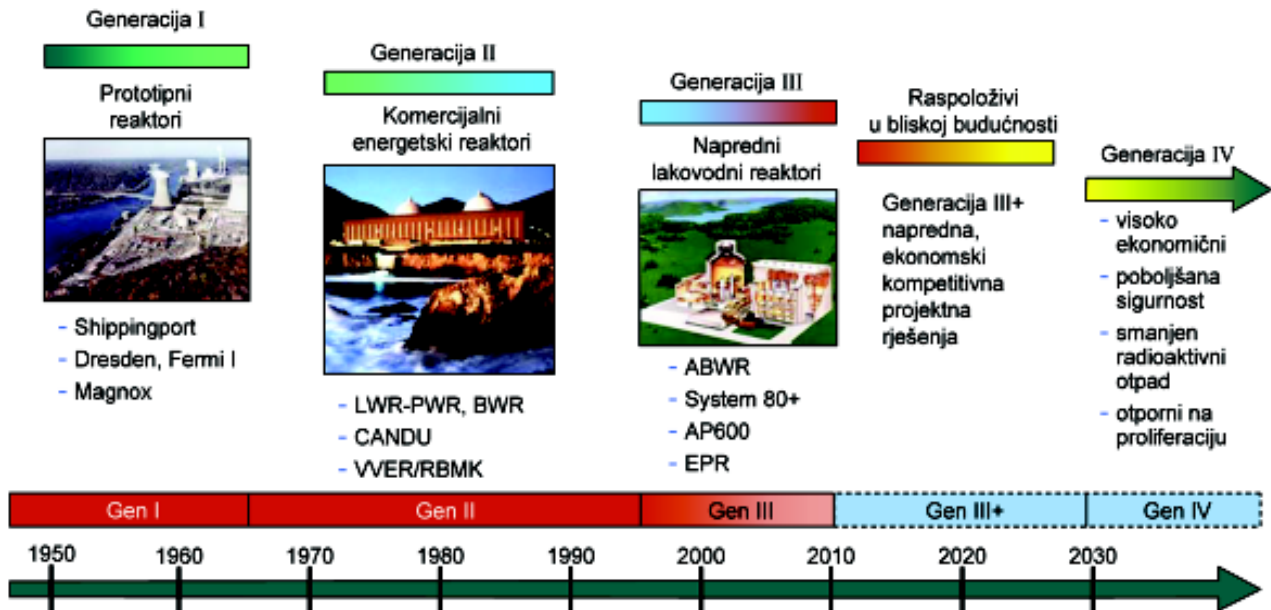
elektrana prema projektnim karakteristikama, odnosno prema vremenu ulaska u komercijalni pogon:

- prva generacija uključuje prototipna postrojenja koja su u pogon ulazila pedesetih godina 20. stoljeća;
- nuklearna energetska postrojenja u pogonu krajem 20. i početkom 21. stoljeća elektrane su druge generacije (tu pripada i NE Krško);
- treća generacija nuklearnih elektrana su postrojenja napredne izvedbe koja koriste poboljšanja postojeće tehnologije kojima se poboljšava sigurnost i ekonomičnost, kao što je npr. intenzivnija uporaba oblika pasivne sigurnosti;
- elektrane četvrte generacije ući će u pogon nakon 30-ih godina 21. stoljeća.

Inicijativa DOE za razvoj nuklearnih reaktora IV. generacije ubrzo je dobila međunarodnu potporu te je 2001. godine osnovan međunarodni forum pod imenom GIF (*Generation IV International Forum*). GIF čine Argentina, Brazil, Kanada, Francuska, Japan, Južna Koreja, Južnoafrička Republika, SAD, Švicarska i Velika Britanija.

Forum Generacije IV definirao je sljedeće ciljeve tehnološkog razvoja novih reaktora:

- elektrane moraju udovoljiti zahtjevima održivog razvoja uz zanemariv utjecaj na okoliš
- stvaranje nuklearnog otpada mora se minimizirati uz znatno smanjenje dugotrajnih utjecaja na okoliš
- proliferacija nuklearnih materijala mora biti praktično onemogućena na tehnološkom nivou



Slika 1. Četiri generacije nuklearnih elektrana [3]

- izvrsnost u sigurnosti i pouzdanosti
- zanemariva mogućnost oštećenja jezgre
- eliminirati potrebu za planiranjem zaštitnih akcija izvan kruga postrojenja
- ostvariti ekonomsku prednost cjelokupnog gorivog ciklusa u odnosu na ostale energetske tehnologije
- financijski rizik izjednačiti s ostalim tehnologijama.

U okviru GIF identificirana je grupa INTD (*International Near Term Deployment*). Njen cilj je premostiti vremenski raspon do 2030. godine ranijim uvođenjem u komercijalni pogon naprednih reaktora koji po svojim karakteristikama dizajna praktički zadovoljavaju zahtjeve četvrte generacije, no već ostvarenim stupnjem svog razvoja omogućavaju primjenu znatno prije 2030, počevši u idućem desetljeću.

U ovom članku opisan je razvoj novog reaktora IRIS (*International Reactor Innovative and Secure*) [4, 5], koji je jedan od projekata INTD grupe, započet krajem 1999. godine u okviru *Nuclear Energy Research Initiative* (NERI) američkog DOE. IRIS je od istraživačkog projekta ubrzo napredovao do tržišno orijentiranog pothvata i formiranja međunarodnog konzorcija, čiji je logo prikazan na slici 2. Konzorcijem upravlja kompanija Westinghouse/BNFL, a sastoji se od 21 organizacije iz 10 zemalja. Konzorcij uključuje širok spektar institucija (navedenih u listi koja slijedi) i na taj način dovodi projektu ekspertizu vrhunskih stručnjaka koji pokrivaju različite aspekte razvoja nuklearnih elektrana.

Industrija:

Westinghouse, SAD; **British Nuclear Fuels (BNFL)**, Velika Britanija; **Ansaldo Energia**, Italija; **Ansaldo**

Camozzi, Italija; **Equipos Nucleares S. A. (ENSA)**, Španjolska; **Nuclebras Equipamentos Pesados (NUCLEP)**, Brazil; **Bechtel, SAD**; **Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering (OKBM)**, Rusija;

Znanstveno-istraživački instituti:

Oak Ridge National Laboratory (ORNL), SAD; **Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)**, Brazil; **Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ)**, Meksiko; **Lithuanian Energy Institute (LEI)**, Litva;

Sveučilišta:

Politecnico di Milano, Italija; **Massachusetts Institute of Technology (MIT)**, SAD; **Tokyo Institute of Technology**, Japan; **Sveučilište u Zagrebu**, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Hrvatska; **Università di Pisa**, Italija; **Politecnico di Torino**, Italija; **Università di Roma**, Italija;

Elektroprivrede:

Tennessee Valley Authority (TVA), SAD; **Eletronuclear**, Brazil;

Sveučilišta (pridruženi članovi):

University of California Berkeley, SAD; **University of Tennessee**, SAD; **Ohio State University**, SAD; **Iowa State University** (and Ames National Laboratory), SAD; **University of Michigan** (and Sandia National Laboratories), SAD.

Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb rano se uključio u projekt IRIS kao punopravni član te sudjeluje



Slika 2. Logo IRIS konzorcija

je u radu s kompjutorskim modelima i analizi sigurnosti. Kako se projekt IRIS reaktora u mnogome bazira na provjerenoj tehnologiji tlakovodnih reaktora kakav je na primjer i reaktor u Krško, to su iskustva stečena u analizama sigurnosti NE Krško kvalificirala fakultetsku grupu za sudjelovanje u projektu IRIS. Ova suradnja se uspješno odvija uz značajnu obostranu korist, FER doprinosi razvoju projekta IRIS, a sudjelovanje u projektu omogućava stjecanje znanja i dragocjenog iskustva u radu na projektu svjetske razine.

Zajednički naponi ovog međunarodnog tima omogućili su brzi napredak projekta, preko početnih studija, zatim faze konceptualnog projekta, do faze preliminarnog projekta koja je pred dovršetkom. Tijekom 2002. godine pristupilo se fazi predlicenciranja IRIS reaktora gdje će projekt IRIS biti predan na ocjenu od strane Nuklearne regulatorne komisije (*Nuclear Regulatory Commission*, NRC) u SAD-u. S obzirom na međunarodni karakter kako konzorcija tako i potencijalnog tržišta za IRIS, suradnja na području sigurnosti us-

postavljena je i s Međunarodnom agencijom za atomsku energiju (*International Atomic Energy Agency*, IAEA) iz Beča. Također je vrijedno spomenuti da je IRIS jedan od reaktora koji je bio uključen od strane tri američke elektroprivrede (Dominion, Entergy i Exelon) u proces traženja preliminarnog lokacijske dozvole (*Early Site Permit*).

Vremenski plan razvoja projekta prikazan je u tablici 1. IRIS bi trebao biti spreman za izvedbu i uključivanje u komercijalni pogon 2012. – 2015. godine. Treba napomenuti da su do sada sve planirane faze izvršene u skladu s planom ili čak i prije njega.

2. GLAVNE KARAKTERISTIKE REAKTORA IRIS

2.1. Osnovni projektni parametri

IRIS je reaktor tipa PWR (*pressurized water reactor*), koji se zasniva na provjerenoj Westinghouse tehnologiji tlakovodnih reaktora, s inovativnim rješenjima kojima se želi ispuniti postavljene zahtjeve na nove reaktore: otpornost na proliferaciju, unaprjeđenje sigurnosti, poboljšanje ekonomije i smanjenje otpada. Zavisno o zahtjevima tržišta IRIS reaktor može biti izgrađen kao jedan ili više modula, svaki sa izlaznom snagom od 335 MWe.

Najvažnije karakteristike IRIS reaktora su [6]:

1. integralna konfiguracija primarnog kruga
2. produženi ciklus jezgre, te pogon bez zaustavljanja za remont u trajanju od četiri godine
3. pristup projektiranju na način da se isključi mogućnost pojave nekog akcidenta (projektom ostvarena sigurnost - "Safety-by-Design" pristup).

Glavni projektni parametri reaktora IRIS dani su u tablici 2.

2.2. Integralni primarni krug

Tipičan tlakovodni reaktor u uporabi karakteriziran je rashladnim krugom (uključujući pumpe, parogeneratore

Tablica 1. Vremenski plan razvoja IRIS-a

Sadržaj	Predviđeno
Tehnička i ekonomska ocjena izvedivosti IRIS projekta (izvršeno)	Do kraja 2000. g.
Izrada konceptualnog projekta i preliminarnog procjene (izvršeno)	Do kraja 2001. g.
Preliminarna procjena troškova izgradnje (izvršeno)	Do kraja 2001. g.
Iniciranje postupka preliminarnog licenciranja (izvršeno)	Jesen 2002. g.
Priprema plana licenciranja (izvršeno)	Jesen 2002. g.
Priprema plana tržišnog nastupa (izvršeno)	Proljeće 2003. g.
Projektiranje	2002.-2005.
Završetak postupka preliminarnog licenciranja	Do kraja 2005. g.
Pridobivanje licence	2008. (2010.)
Izvedba prvog postrojenja IRIS	2012. (2015.)

Tablica 2. Glavni projektni parametri reaktora IRIS

Glavni projektni parametri	
Toplinska snaga jezgre	1000 MWt
Električna snaga	335 MWe
Sustav za proizvodnju pare	
Primarni krug	Integralnog tipa
Temperatura i tlak pare	317°C, 5.8 MPa
Temperatura i tlak pojne vode	224°C, 6.4 MPa
Sustav hlađenja reaktora	
Protok primarnog hladioca	4700 kg/s
Radni tlak reaktora	15.5 MPa
Temperatura hladioca na ulazu i izlazu iz jezgre	292°C / 330°C
Jezgra reaktora	
Visina aktivne jezgre	4.267 m
Inventar goriva	48.5 tU
Prosječna linearna gustoća snage	10.0 kW/m
Gorivo	Sinter. UO ₂
Broj gorivih elemenata	89
Gorivi element	17x17
Broj gorivih šipki u gorivom elementu	264
Vanjski promjer gorive šipke	9.5 mm
Obogaćenje	Do 4.95 wt% U-235
Trajanje ravnotežnog gorivog ciklusa	30-48 mjeseci
Prosječni otpusni odgor	Do 60,000 MWd/tU
Reaktorska posuda	
Oblik i dimenzije	Cilindrična, unutrašnji promjer 6.21 m
Debljina stijenke posude	285 mm
Ukupna visina	21.3 m
Parogeneratori	
Tip parogeneratora	Protočni, s pregrijanom parom
Cijevi	Helikoidne, primarni hladioc izvana
Broj parogeneratora	8
Toplinska snaga (po parogeneratoru)	125 MWt
Reaktorske pumpe	
Tip	Pumpe s aksijalnim protokom (propelerske pumpe), potpuno uronjene
Broj	8
Porast tlaka	19.8 m (ekvivalent)
Primarni kontejnment	
Tip	Čelični
Oblik	Kuglasti, promjera 25 m
Maksimalno dopušteni tlak i temperatura	1300 kPa, 200 °C

i tlačnik izvan reaktorske posude (slika 3a). Na slici 3b prikazana je integralna konfiguracija reaktora (pri čemu su eliminirani vanjski cjevovodi primarnog rashladnog kruga). Reaktorska posuda je povećana, ali je kontejnment (slika 3c) i ukupna veličina postrojenja smanjena, što ima pozitivan utjecaj na sigurnost i ekonomičnost postrojenja.

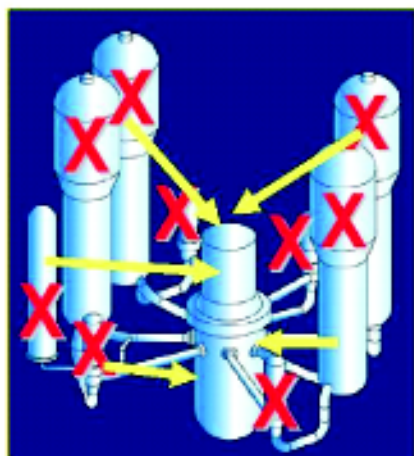
2.3. Integralna reaktorska posuda

Glavne komponente primarnog kruga IRIS-a smještene su unutar integralne reaktorske posude [7], slika 4. Kao

što je prikazano, reaktorska posuda sadrži jezgru reaktora s nuklearnim gorivom, regulacijske šipke s pogonskim mehanizmom, osam heliokoidalnih parogeneratora, osam primarnih pumpi, tlačnik smješten u vrhu (gornjoj kaloti) reaktorske posude. Protok rashladne vode unutar reaktorske posude shematski je prikazan na slici 4.

2.4. Jezgra reaktora i gorivo

Jezgra IRIS reaktora zasniva se na tehnološkim rješenjima koja se koriste i u današnjim tlakovodnim reak-



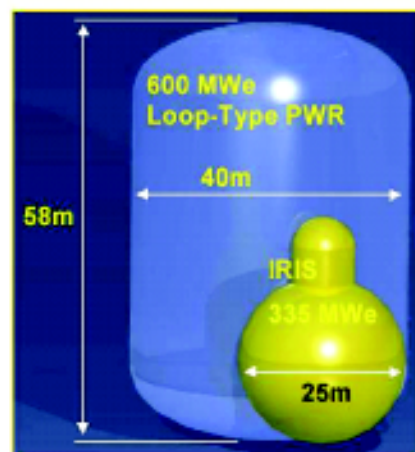
Slika 3a

Reaktorska posuda, četiri rashladna kruga i tlačnik



Slika 3b

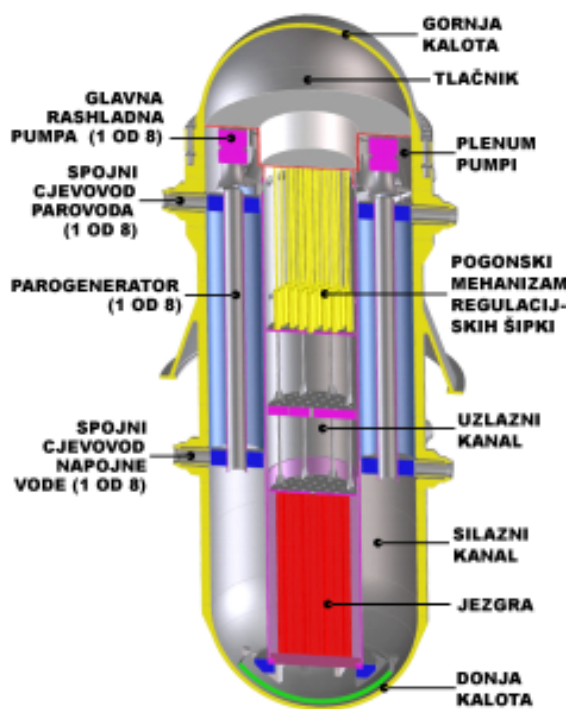
Reaktorska posuda integralne konfiguracije



Slika 3c

Usporedba veličine kontejnmenta

Slika 3. Usporedba reaktora s vanjskim primarnim krugom i reaktora integralne konfiguracije



Slika 4. Integralna reaktorska posuda

torima. Ono što je čini različitom od standardne jezgre tlakovodnog reaktora proizlazi iz jednog od osnovnih projektnih ciljeva razvoja IRIS-a, a to je produljenje vremena između planiranih obustava reaktora. Osim optimiziranog održavanja, nužno je projektirati jezgru reaktora u skladu s tim zahtjevom, a da se pri tome praktično onemogućuje proliferacija fisisonog materijala.

S tom svrhom napravljena je serija studija u kojima su se razmatrale razne opcije koje su uz UO_2 uključivale i MOX gorivo, a kojima je bio cilj istražiti utjecaj ra-

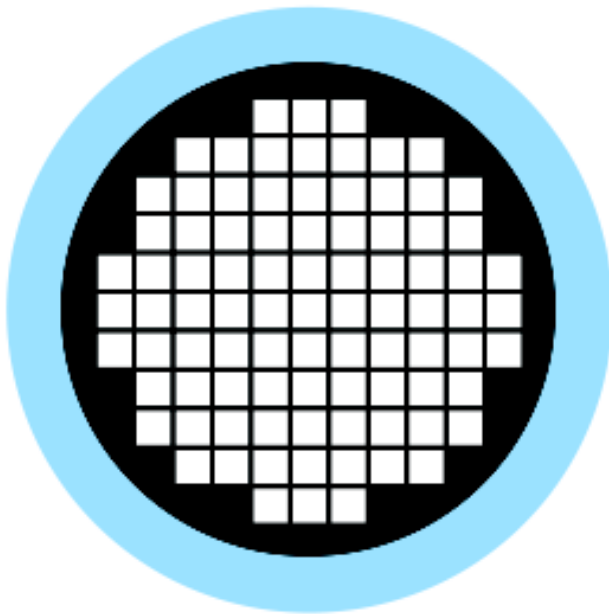
zličitih konfiguracija jezgre i obogaćenja goriva na otpusni odgor, odnosno ciklus izmjene goriva [8]. Pregled rezultata prikazan je u tablici 3. Tako su rezultati studija ukazali npr. da koncept "otvorene" rešetke povećanog omjera p/d (omjer koraka rešetke i promjera gorivne šipke) povećava odgor, a da je uz više početno obogaćenje (10%, dok se danas koristi 4 – 5% u tlakovodnim reaktorima) moguće postići i odgor od ~80.000 MWd/THM što bi moglo produljiti vrijeme između dvije izmjene goriva na 8 – 10 godina. Projektni cilj je međutim postavljen na 4-godišnji ciklus izmjene goriva koji je moguće ostvariti 5%-tnim obogaćenjem koje je u potpunosti kompatibilno s postojećom, komercijalnom i licenciranom tehnologijom izrade goriva. Konfiguracija jezgre istodobno omogućava i produljenje ciklusa povećanjem početne koncentracije fisisonog materijala, ali i variranjem omjera moderacije.

Jezgra reaktora IRIS sastoji se od 89 gorivih elemenata (slika 5), a nešto je duža od jezgre NE Krško. Zasnovana je na standardnom Westinghouseovom rješenju za rešetku gorivog elementa 17x17. Aktivna visina gorivog elementa je 4.27 m, a sastoji se od 264 gorive šipke vanjskog promjera 9.5 mm. Središnja pozicija unutar gorivog elementa rezervirana je za instrumentaciju, a 24 pozicije predstavljaju vodilice kontrolnih šipki. Niska gustoća snage znatno povećava margine za termalno opterećenje šipki, omogućuje veću pogonsku fleksibilnost i produljeni ciklus. Početna konfiguracija jezgre predviđa maksimalno 4.95% obogaćenje UO_2 , uz korištenje manje obogaćenog UO_2 na periferiji jezgre. Kontrola reaktivnosti tijekom ciklusa ostvaruje se korištenjem sagorivih absorbera na bazi Er_2O_3 , kontrolnih šipki kao i uz minimalnu koncentraciju bora u hladiodcu. Niska koncentracija bora čini moderatorski temperaturni koeficijent još negativnijim čime se unaprjeđuje inherentno svojstvo kontrole reaktivnosti koje od-

Tablica 3. Različite opcije ciklusa jezgre reaktora IRIS

	Referentna jezgra	Moguća poboljšanja UO_2	Moguće korištenje MOX
Vrsta goriva	$UO_2 < 5\%$	$UO_2 > 5\%$	MOX $> 5\%$
Koncentracija fisioh izotopa	4.95%	~7 – 8%	~9 – 10%
Duljina ciklusa jezgre	~4 god.	~8 god.	~8 god.
Odnos koraka rešetke gorivog elementa i promjera šipke	1.4	1.45	1.7
Odnos volumena moderatora i volumena goriva	2.0	2.2	3.7

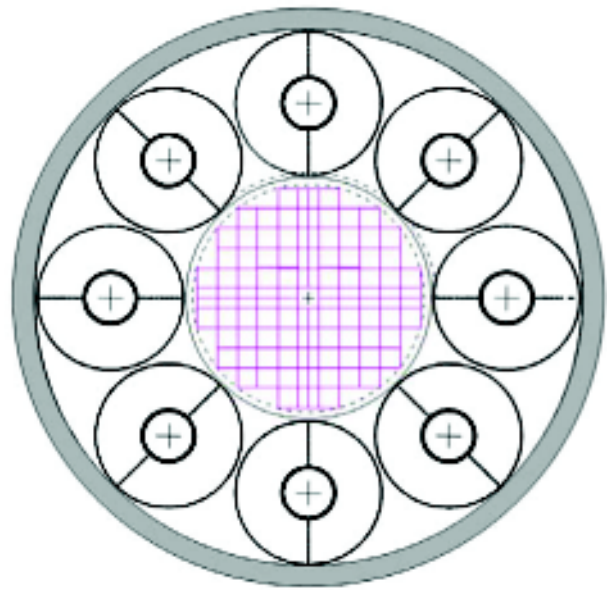
likuje jezgre tlakovodnih reaktora. Osim toga, novost u projektu jezgre je i korištenje čeličnog reflektora što poboljšava ekonomiju neutrona.

**Slika 5. Konfiguracije jezgre reaktora IRIS-a**

Početna jezgra predviđena je za 3 – 3,5 godišnji ciklus uz zamjenu polovice gorivih elemenata nakon tog perioda. Projektom je predviđena i mogućnost 4-godišnjeg ciklusa uz potpunu zamjenu svih gorivih elemenata, ali u tom slučaju bi ekonomija goriva bila nešto lošija.

2.5. Parogeneratori

IRIS koristi protočne parogeneratore s pregrijanom parom. Cjevi su helikoidalnog oblika [9] pri čemu je primarni hladioč izvan cijevi, a sekundarni u cijevima (za razliku od tipičnog tlakovodnog reaktora), pri čemu svaki modul ima 656 cijevi. Osam modula parogeneratora (125 MWt po modulu) smješteno je u prstenu između uzlaznog kanala (vanjskog promjera 2.85 m) i reaktorske posude (unutrašnjeg promjera 6.21 m), kao što je prikazano na slici 6.

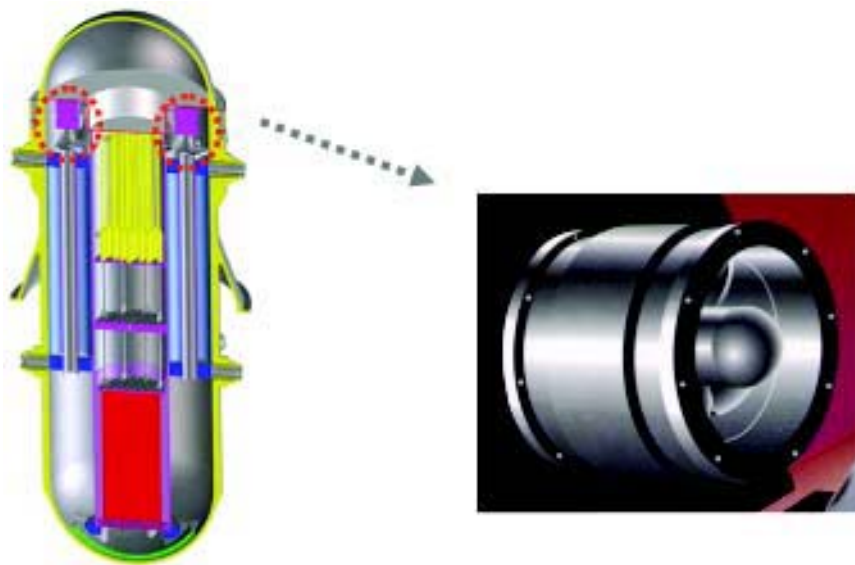
**Slika 6. Smještaj 8 parogenerators**

2.6. Reaktorske pumpe

Pumpe reaktora IRIS su pumpe s aksijalnim protokom (pumpe propelerskog tipa) [10] kakve se koriste u kemijskim postrojenjima, na visokim temperaturama (do 500 °C), i imaju veliki protok ali mali porast tlaka. Motor i pumpa se sastoje od dva koncentrična cilindra, vanjski je stator a unutarnji rotor koji ima specifični imeler za pumpe velike brzine (slika 7). Pumpe su unutar posude reaktora potpuno potopljene u hladioč, jedino kablovi za napajanje pumpi ulaze kroz penetraciju na posudi. Ovakve pumpe nisu mogle biti korištene u nuklearnim postrojenjima s vanjskim cjevovodom rashladnog kruga zbog velikih padova tlaka u toj izvedbi, međutim integralna konfiguracija primarnog kruga IRIS-a predstavlja idealnu priliku za korištenje jedinstvenih karakteristika i prednosti ovih pumpi (jednostavnost, pouzdanost, minimalno održavanje).

2.7. Tlačnik

Smještaj tlačnika (slika 8) u gornju kalotu reaktorske posude IRIS-a [11] specifično je rješenje koje zna-



Slika 7. Reaktorske pumpe s aksijalnim protokom

čajno odstupa od standardnih rješenja za tlakovodne reaktore. Naime, u današnjim tlakovodnim reaktorima tlačnik je zasebna posuda spojena relativno dugačkim cjevovodom na toplu granu primarnog rashladnog kruga.

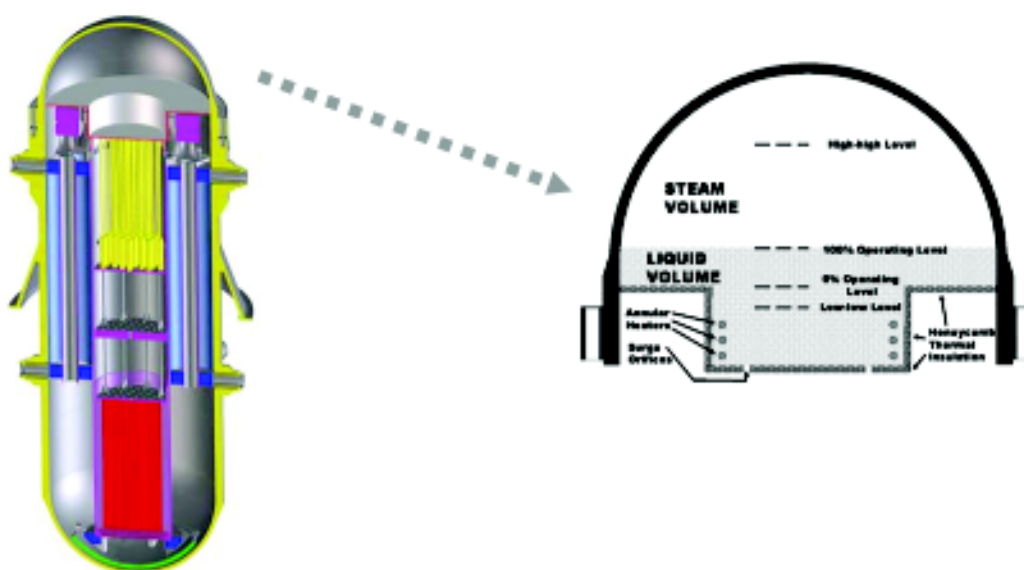
Korištenjem gornjeg prostora reaktorske posude za tlačnik dobiven je veliki volumen za vodu i paru tlačnika. Ukupni volumen tlačnika je 71 m³, od čega je parni dio 49 m³. Sposobnost ublažavanja tlačnih poremećaja razmjerna je odnosu volumena tlačnika i nominalne snage reaktora. Ovaj odnos je kod IRIS-a oko 4 puta “bolji” nego što je to slučaj za veće tlakovodne reaktore s vanjskim cjevovodom i tlačnikom. Pozitivna je strana inherentne regulacijske karakteristike i mo-

gućnost projektiranja sustava kontrole tlaka i bez potrebe za tuširanjem parnog prostora.

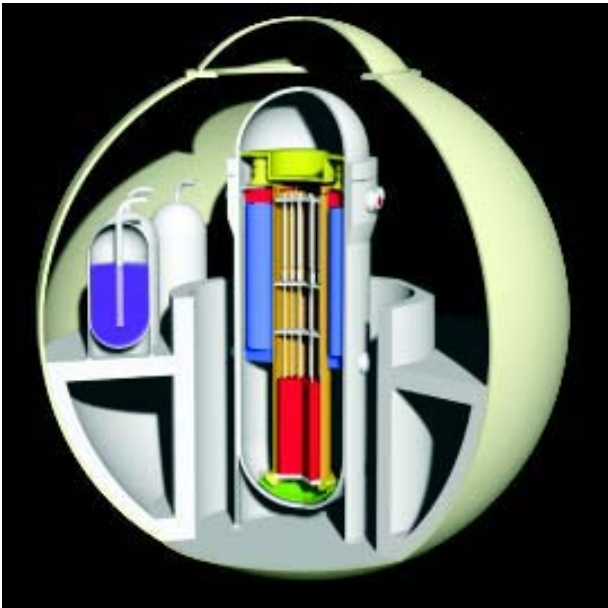
Smještaj tlačnika neposredno iznad usisa glavnih rashladnih pumpi zahtijeva dobru termičku izolaciju ove komponente od ostatka sustava budući da je prostor tlačnika na temperaturi zasićenja, dok je u ostatku reaktorske posude rashladni fluid podhlađen.

2.8. Kontejnment

IRIS koristi čelični kontejnment sferičnog oblika (slika 9) kompaktnih dimenzija (promjer 25 m). To omogućava izvedbu s relativno visokim dopuštenim maksimalnim tlakom (oko 1.3 MPa), što povoljno utječe na sigurnost.



Slika 8. Tlačnik



Slika 9. IRIS kontejnment

2.9. Optimizirano održavanje

Jedna od bitnih značajki IRIS reaktora je da može raditi s produženim gorivim ciklusom koji u referentnom projektu iznosi 3 do 4 godine. Da bi se ova prednost IRIS reaktora mogla iskoristiti potrebno je jednako produžiti i period redovnog održavanja, na 48 mjeseci, u usporedbi s uobičajenim ciklusom remonta svakih 18

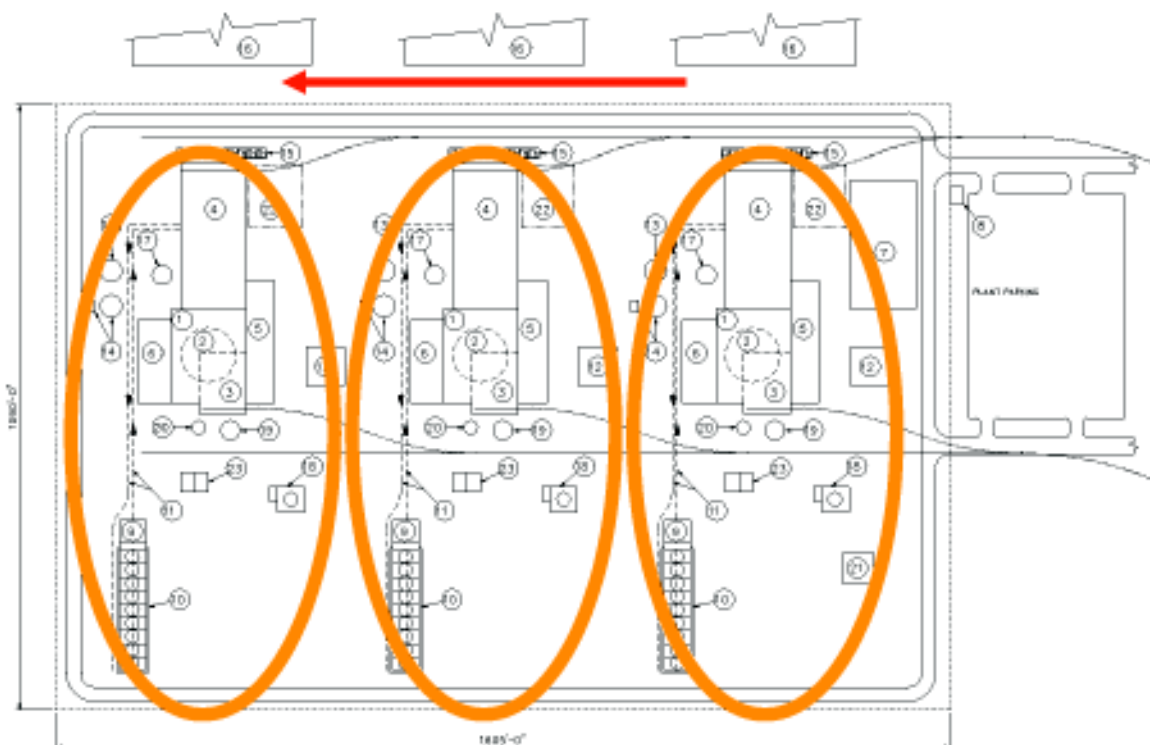
mjeseci. To će se postići komponentama koje ne zahtijevaju održavanje u periodu kraćem od 48 mjeseci ili će se testiranja i održavanja raditi tijekom pogona elektrane.

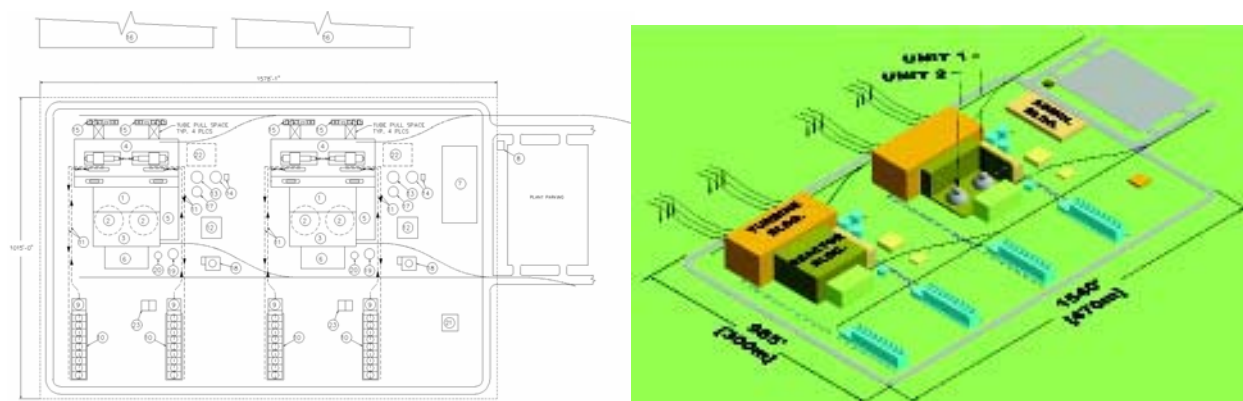
U prethodnoj studiji MIT-a za PWR reaktore [12] identificirane su i pojedinačno razmotrene 3743 stavke koje se moraju održavati, od toga 2537 tijekom remonta. Od ovih zadnjih 1858 mogu zadovoljiti zahtjev za ciklusom održavanja ne kraćim od 48 mjeseci, daljih 625 se može rekategorizirati za održavanje tijekom pogona (bez potrebe za zaustavljanjem), dok su ostale neriješene 54 stavke koje zahtijevaju period održavanja kraći od 48 mjeseci. Kod IRIS-a, zbog njegove pojednostavljene konstrukcije, većina od tih 54 stavki otpada, ali ipak preostaje 7 koje traže nova rješenja [13]. Ovdje se koriste velika iskustva u pogonu nuklearnih elektrana koje ima elektroprivreda *Tennessee Valley Authority* (članica IRIS konzorcijuma) te najnovije metode u dijagnosticiranju stanja opreme koje razvijaju drugi IRIS članovi, te su identificirana moguća rješenja za preostalih 7 stavki [14].

Uz četverogodišnji remontni period IRIS će osjetno smanjiti varijabilne troškove pogona te će ujedno zadovoljiti visoki zahtjev za prosječni faktor opterećenja elektrane od 95%.

2.10. Modularna izvedba i prostorni raspored objekata na lokaciji elektrane

Modularna izvedba IRIS-a omogućava postupno dodavanje pojedinih samostalnih ili višestrukih jedinica (sva-

Slika 10. Prostorni raspored objekata elektrane u izvedbi s više jednostrukih jedinica (prikazano ukupno $3 \times 335 = 1005 \text{ MWe}$)



Slika 11. Prostorni raspored objekata elektrane u izvedbi s više dvostrukih jedinica (prikazano ukupno 2x2x335 MWe = 1340MWe)

ka snage 335 MWe) na lokaciji elektrane. Da bi se zadovoljio raspon zahtjeva svjetskog tržišta, razvijene su dvije varijante rasporeda objekata na lokaciji elektrane, te identificirani odgovarajući zahtjevi. Prva opcija, prikazana na slici 10, sastoji se od više samostalnih jedinica, dok slika 11 ilustrira drugu opciju, raspored baziran na dvostrukim jedinicama.

U prvoj opciji, svaka je jedinica potpuno samostalna, tj. nema zajedničkih zgrada niti sustava. Izvedba se odvija u nizu, jedinicu po jedinicu, pri čemu svaka jedinica započinje proizvodnju električne energije (a time počinje i donositi prihod) odmah po dovršenju, nezavisno od sljedeće jedinice koja još može biti u izgradnji.

U drugoj opciji, dvostruke bi se jedinice sastojale od dva IRIS reaktora (2x335 MWe) s pripadnom turbinom i generatorom, kondezatorom i sustavom pojne vode u zajedničkoj turbinskoj zgradi. U ovakvoj kombinaciji dvostruke jedinice imale bi i mnogo zajedničkih sustava, funkcija i dijelova postrojenja kao na primjer: uređaji za izmjenu goriva, bazen za odgoreno gorivo, obrada radioaktivnog otpada, itd. Dvostruke jedinice dijele kontrolnu sobu, ali imaju odvojene sigurnosne i zaštitne sustave. Ovim se pristupom želi smanjiti troškove i vrijeme izgradnje, no on također zahtijeva da se novi kapaciteti grade i dodaju u koracima od 670 MWe. Dvostruke jedinice testiraju se zajednički te nakon toga idu u pogon dok se na istoj lokaciji mogu graditi nove jedinice.

Očekuje se da bi elektroenergetskom sustavu Hrvatske više pogodovalo postupno dodavanje pojedinih jedinica. Implikacije na financiranje dodatno su razmotrene u sekciji 4.

3. SIGURNOST REAKTORA IRIS

3.1. IRIS pristup – projektom ostvarena sigurnost

Nuklearne elektrane koje su danas u pogonu (Generacija-II, slika 1) zasnivaju se na principu tzv. obrane po

dubini, koja aktivnim sigurnosnim sustavima štiti višestruke barijere koje su projektom uspostavljene kako bi se onemogućio ispušt radioaktivnosti u okoliš. Barijere su pri tome zaštićene nezavisnim aktivnim sigurnosnim sustavima.

Sigurnost IRIS reaktora [6] poboljšava obranu po dubini i uključuje tri glavna nivoa:

1. Prvi nivo je princip „projektom ostvarene sigurnosti“ („safety-by-design“™), kojem je cilj ukloniti mogućnost da dođe do akcidenta, umjesto potrebe razrješavanja posljedica.
2. Drugi nivo predstavljaju pasivni pojednostavljeni sigurnosni sustavi, koji osiguravaju zaštitu od preostalih akcidenata i uklanjaju ili ublažuju njihove posljedice.
3. Treći nivo čine aktivni sustavi, koji nisu sigurnosne kategorije i njihov doprinos se ne uzima u obzir u determinističkim sigurnosnim analizama, ali mogu doprinijeti smanjenju procijenjene učestalosti oštećenja jezgre (CDF, *Core Damage Frequency*).

Prvi nivo sigurnosti

Sve nuklearne elektrane razmatraju niz hipotetičnih akcidenata. Kod IRIS-a, projektom ostvarena sigurnost („safety-by-design“™) predstavlja princip projektiranja nuklearne elektrane pri čemu se:

- fizički eliminira mogućnost pojave niza akcidenata (pa time automatski otpada i potreba za onim sigurnosnim sustavima koji bi sprječavali posljedice tih akcidenata),
- umanjuje vjerojatnost pojave većine preostalih akcidentalnih scenarija karakterističnih za “standardne” tlakovodne reaktore, i
- značajno smanjuju posljedice vjerojatnih akcidentalnih scenarija.

Integralna konfiguracija pogoduje primjeni projektom ostvarene sigurnosti, npr. primarni rashladni krug unutar reaktorske posude eliminira mogućnost pojave velike izljevne nezgode jer su sve penetracije na posudi

znatno manjeg promjera od glavnih cjevovoda “standardnih” tlakovodnih elektrana. Velika količina vode koja se nalazi unutar posude IRIS reaktora ujedno ga čini i “toplinski” inertnim te je vrijeme potrebno da se zagrije ili ohladi hladio nakon pojave akcidenta znatno produženo u odnosu na današnje reaktore. Time je omogućeno da sigurnosni sustavi preuzmu svoju funkciju i prije nego što posljedice postanu ozbiljne. Također, integralnom izvedbom znatno je smanjen pad tlaka unutar primarnog cirkulacijskog kruga, te uz veliku razliku visina između izvora (jezgra) i ponora topline (parogenerator) omogućava razvoj snažne prirodne cirkulacije nakon ispada cirkulacijskih pumpi iz pogona. Smještanjem čak osam parogeneratora i cirkulacijskih pumpi unutar posude postignuta je visoka redundancija te značajno smanjene posljedice ispada bilo koje od tih komponenata. Time su umanjene posljedice svih akcidenta u kojima dolazi do gubitka prisilne cirkulacije, npr. gubitak ili zaglavljivanje rotora cirkulacijske pumpe. Helikoidna izvedba parogeneratora smješta primarno rashladno sredstvo u anulus parogeneratora, a sekundarno unutar cijevi, pa je time ostvaren pritisak na unutrašnjost cijevi (što znači da bi u slučaju pucaanja cijev “implodirala” i bitno reducirala gubitak kroz mjesto loma).

Primarni cjevovodi, vanjske pumpe i zasebne posude tlačnika i parogeneratora u potpunosti su eliminirani, čime je omogućen smještaj reaktora u mali, kompaktni kontejnment koji se zbog svoje veličine može uspješno projektirati za znatno viša post-akcidentalna tlačna opterećenja od posuda današnjih tlakovodnih reaktora.

Tablica 4 prikazuje najznačajnija poboljšanja IRIS reaktora slijedom pristupa projektom ostvarene sigurnosti i principa inherentne sigurnosti.

Ukoliko pojavu određenog akcidenta nije moguće u potpunosti eliminirati, projektom se nastoji njegove posljedice smanjiti inherentnim svojstvima reaktora, kao i korištenjem pasivnih sigurnosnih sustava. Pri tom se inherentno sigurnim reaktorskim postrojenjem smatra ono kod kojeg osiguranje zaštitnih barijera (jezgre i kontejnmenta prije svega) ne ovisi o električki pokretanim komponentama, nego o djelovanju uvijek prisutnih prirodnih sila (kao što je gravitacija, odnosno uzgon), uskladištenoj energiji (komprimirani plin, akumulatorske baterije) i pasivnim mehaničkim komponentama (nepovratni ventili). Kod standardne izvedbe tlakovodnog reaktora (Generacija II) također je moguće hlađenje jezgre prirodnom cirkulacijom. Međutim, kod današnjih nuklearnih elektrana nije moguće kroz dulji

Tablica 4. Implementacija projektom uvjetovane sigurnosti IRIS reaktora

Projektna osobitost	Utjecaj na sigurnost	Relevantni akcident	Posljedice
Integralna izvedba	Eliminacija vanjskih cjevovoda većeg promjera	velika izljevna nezgoda	Onemogućene
Visoka posuda s uzdignutim parogeneratorima	smještaj pogonskog mehanizma kontrolnih šipki unutar posude	Dodavanje reaktivnosti izbacivanjem šipki	Onemogućene
	Poboljšana prirodna cirkulacija	Svi akcidenti s gubitkom prisilne cirkulacije	Ublažene, eliminiran zahtjev za visokom inercijom pumpi
Nizak pad tlaka u rashladnom krugu, 8 cirkulacijskih pumpi	Protok kroz jezgru održava prijenos topline iznad krize ključanja u slučaju ispada cirkulacijske pumpe	Gubitak prisilne cirkulacije (npr., zaglavljivanje rotora ili lom osovine)	Onemogućen lom osovine, ublažene posljedice zaglavljivanja rotora
Velika masa vode unutar posude	Usporava prijelazne pojave i održava poplavljenost jezgre	Mala i srednja izljevna nezgoda	Jezgra poplavljena i bez ubrizgavanja sustava za zaštitno hlađenje
Kompaktni kontejnment visokog projektnog tlaka	Smanjen potencijal za gubitak rashladnog sredstva		
Prijenos topline unutar posude			
Parogenerator i pripadajući cjevovodi projektirani na primarni tlak	Primarno rashladno sredstvo ne ugrožava projektni tlak sekundarne strane	Lom cijevi parogeneratora	Ublažene, pojednostavljena procedura za saniranje akcidenta
	Eliminirana potreba za rasteretnim ventilima	Lomovi cjevovoda pojne vode i parovoda	Ublažene, smanjena vjerojatnost akcidenta
Protočni parogeneratori	Mali inventar sekundarne strane		
Produženi ciklus jezgre	Manipulacije gorivim elementima smanjene	Akcidenti zamjene goriva	Smanjena vjerojatnost akcidenta

vremenski period održati hlađenje jezgre prirodnom cirkulacijom fluida kao ni mogućnost odvođenja ostatne topline jezgre ako je izgubljena funkcija parogenerato-
ra.

Kao rezultat tog sustavnog pristupa, od osam projek-
tom predviđenih kvarova četvrte kategorije (“class IV
design basis events”), tj. onih kvarova koji potencijal-
no mogu dovesti do najtežih posljedica, samo jedan
ostaje u četvrtoj kategoriji za IRIS, dok je drugih se-
dam ili uklonjeno, ili su vjerojatnost i posljedice akci-
denta smanjene do te mjere da se mogu premjestiti u
“nižu” kategoriju.

Drugi nivo sigurnosti

Uklanjanje mogućnosti pojave dijela akcidenata omo-
gućava pojednostavljenje sigurnosnih sustava i projek-
ta IRIS-a, što istodobno rezultira poboljšanjem si-
gurnosti, pouzdanosti i ekonomičnosti. Drugim riječi-
ma, poboljšanje sigurnosti i ekonomičnosti nisu suprot-
ni ciljevi kao kod elektrana s aktivnim sigurnosnim sus-
tavima, nego naprotiv, idu zajedno i podržavaju jedan
drugoga u IRIS-u.

Treći nivo sigurnosti

Već u ranoj fazi projektiranja korištene su PRA analize
(probablističke analize sigurnosti) da bi se identifi-
ciraile potencijalno slabe točke i ukazalo na moguća
poboljšanja sa stanovišta sigurnosti. PRA je rezultirao
u modifikacijama nekih reaktorskih sustava i njihove
povezanosti, što je dovelo do smanjenja procijenjene
učestalosti oštećenja jezgre. Nakon tih modifikacija,
preliminarna PRA analiza tzv. “level 1” (akcidenti
uzrokovani unutrašnjim događajima) procijenila je
smanjenje CDF na približno 2×10^{-8} /god [15], bar jedan
red veličine niže nego u naprednim lakovodnim reak-
torima. Uslijedila je analiza procjene učestalosti ispu-
štanja radioaktivnosti brzo nakon hipotetičkog akciden-
ta (LERF, Large Early Release Frequency) koja je tako-
đer rezultirala u vrlo niskoj vrijednosti oko 6×10^{-10} /god
[16], opet bar red veličine bolje od naprednih LWRs s

vanjskim primarnim krugom, a više redova veličine
bolje nego u današnjim LWRs.

Treba napomenuti da su i današnje nuklearne elektrane
izuzetno pouzdane i sigurna postrojenja, no impresivne
sigurnosne karakteristike IRIS-a, sažete u tablici 5,
mogu doprinijeti novom načinu licenciranja sa znatnim
društveno-ekonomskim prednostima.

Naime, kao prvi korak, poboljšana obrana po dubini
zahvaljujući projektom ostvarenoj sigurnosti te elimi-
nacija ili smanjenje posljedica akcidenata četvrte kate-
gorije (preostao svega jedan od osam) u kombinaciji sa
poboljšanjem za jedan ili više redova veličine za CDF i
LERF, te ocjena projekta na bazi procjene rizika («risk-
informed licensing») mogu omogućiti IRIS-u licen-
ciranje pri čemu bi potreba za planiranjem evakuacije
izvan kruga elektrane bila uklonjena, čak i u slučaju
veće nezgode.

Ovaj cilj postavljen je i od IAEA kao jedan od osnovnih
zahtjeva za napredne reaktore [17], a imao bi značajan
pozitivan socio-ekonomski učinak. Ekonomski, postao
bi prihvatljiv širi izbor lokacija s obzirom na smanjene
zahtjeve planiranja hitne evakuacije, smanjili bi se troš-
kovi kako planiranja tako i fizičke pripreme lokacije.
Elektrana bi mogla biti smještena bliže urbanim sredi-
nima i tako smanjiti troškove transmisije i omogućiti
efikasnu ko-generaciju (grijanje, topla voda, procesna
para).

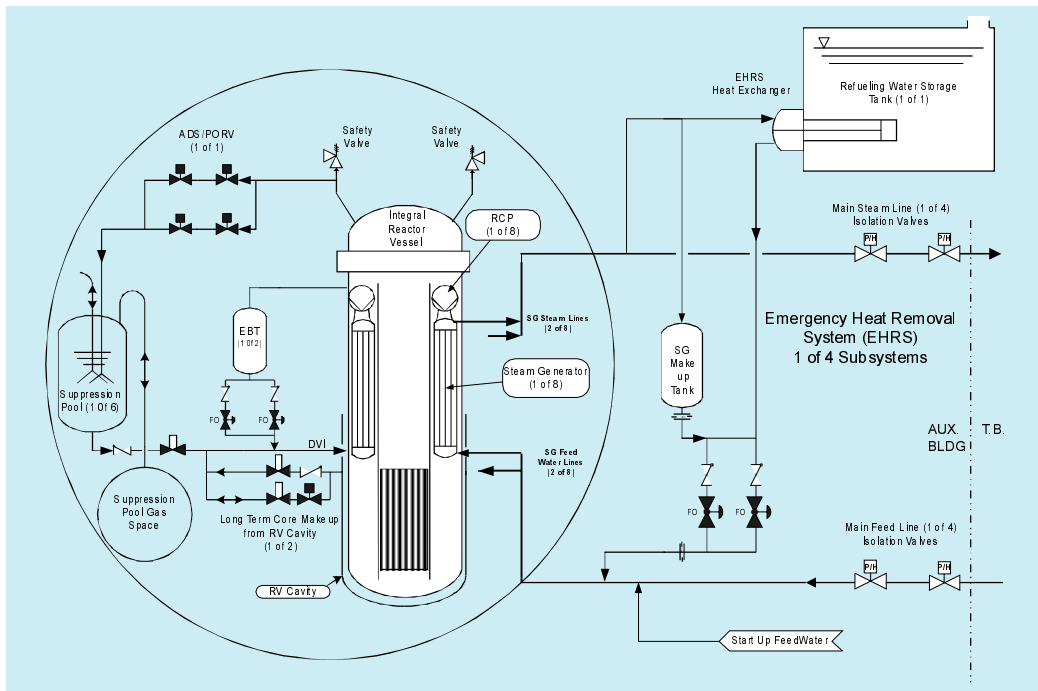
3.2. Sigurnosni sustavi

Slika 12 prikazuje shematski sigurnosni sustav reakto-
ra IRIS [6]. Visoki stupanj integriranosti zaštitne (kon-
tejnmenta) i reaktorske posude bio je osnovica za pro-
jektiranje sigurnosnih sustava.

S obzirom na zaštitne i sigurnosne funkcije, za sigu-
ran je pogon reaktora najvažnije osigurati pravodobnu
obustavu lančane reakcije te potom kontinuirano
odvođenje ostatne topline u akcidentalnim uvjetima.
Stoga su tradicionalno najvažniji sigurnosni sustavi:
sustav za obustavu reaktora i sustav za hlađenje jezgre
u nuždi.

Tablica 5. Sigurnosne karakteristike IRIS

Karakteristika – kriterij	Napredni lakovodni reaktori	IRIS
Obrana po dubini (Defense-in-Depth, DID)	Pasivni sustavi, aktivni sustavi	Dodan jedan nivo zaštite, eliminacija inicijatora akcidenata
Događaj (Design Basis Events) četvrte kategorije	Tipično se razmatra 8 ovakvih akcidenata	Svega jedan preostaje četvrte kategorije (akcident pri rukovanju gorivom)
Učestalost oštećenja jezgre (Core Damage Frequency, CDF)	$\sim 10^{-6}$ — 10^{-7} /year	$\sim 10^{-8}$ /year
Učestalost ranog ispuštanja veće količine radioaktivnosti (Large Early Release Frequency, LERF)	$\sim 10^{-6}$ — 10^{-8} /year	$\sim 10^{-9}$ /year



Slika 12. Sigurnosni sustavi reaktora IRIS

Sustav za hlađenje u nuždi reaktora IRIS bitno se razlikuje od rješenja koja su prisutna u "standardnim" tlakovodnim reaktorima. Naime, inherentna sigurnosna svojstva omogućila su projektiranje bitno pojednostavljenog pasivnog sustava za hlađenje jezgre u nuždi. Hlađenje reaktora IRIS u slučaju nužde predviđeno je posrednim putem korištenjem sekundarnog rashladnog kruga. Sustav za hlađenje u slučaju nužde (EHRS – Emergency Heat Removal System) spojen je na cjevovode sekundarnog rashladnog kruga, (slika 12). Na svaki par cjevovoda (pojne vode i parovoda) spojen je po jedan izmjenjivač topline, odnosno kondenzator, budući da se očekuje da će u njemu kondenzirati para stvorena na parogeneratorima. Sva 4 izmjenjivača topline smještena su u vanjski bazen koji se nalazi 10-ak m iznad izlaza parovoda iz parogeneratora. Takvim je smještajem stvoren rashladni krug u kojem je ponor topline (vanjski bazen) dovoljno uzdignut iznad izvora topline (u ovom slučaju parogeneratora koji posredno hladi jezgru) za održavanje prirodne cirkulacije te se sustav i stoga smatra "pasivnim".

Brza obustava reaktora odvija se u "standardnim" tlakovodnim reaktorima, ali i IRIS-u, uranjanjem kontrolnih i zaustavnih sklopova šipki u jezgru. Sustav za boriranje jezgre u nuždi neophodna je rezerva funkciji obustave lančane reakcije. Zadatak je sustava za boriranje jezgre u slučaju nužde sprječavanje posljedica tranzijentna prekomjernog hlađenja kod kojih bi moglo doći do povrata na snagu te kao rezervnog sustava u slučaju akcidenta u kojim dolazi do otkazivanja sustava za brzu obustavu. Projektom su predviđena dva nezavisna spremnika izvan reaktorske posude koji su odvojenim cjevovodima spojeni na kolektore za direkt-

no ubrizgavanje u reaktorsku posudu (DVI – Direct Vessel Injection). Kolektori su spojeni na silazni kanal reaktorske posude i dno anulusa za smještaj parogeneratora čime se omogućava injekcija borirane vode u jezgru. Spremnici su cjevovodima također spojeni s gornje strane na vrh uzlaznog kanala čime se omogućava konstantna recirkulacija tijekom faze ubrizgavanja. Naime, stupac vode u spremnicima silom gravitacije stvara dostatnu razliku tlaka za ubrizgavanje borirane vode u silazni kanal jer je dno spremnika otprilike 7 m iznad vrha silaznog kanala. Sustav je tijekom normalnog pogona izoliran ventilima koji se otvaraju na signal sigurnosnog sustava.

Bazeni za redukciju tlaka smanjuju ekscurzije tlaka unutar kontejnmenta nakon većih ispuštanja, ali također služe i kao rezervni izvori rashladnog sredstva za nadopunu reaktorske posude. Budući da se nalaze visoko iznad jezgre reaktora, u slučaju kada se kontejnment i primarni rashladni krug nađu na istom tlaku, npr. u slučaju izljevne nezgode, moguće je samo silom gravitacije iz njih slijevati rashladno sredstvo u jezgru.

Preliminarna razmatranja ukazuju da bi projektna rješenja IRIS-a praktično mogla eliminirati cijelu klasu hipotetičkih projektnih akcidenta koji za posljedicu mogu imati djelomično oštećenje gorivih elemenata. U slučaju, npr. male izljevne nezgode (Small Break LOCA) prema preliminarnim analizama provedenim na FER-u uopće ne dolazi do kratkotrajnog pregrijanja jezgre. Upravo na primjeru male izljevne nezgode moguće je iščitati sve prednosti inovativnog pristupa sigurnosti kakav je korišten prilikom projektiranja IRIS reaktora. Posuda IRIS reaktora termodinamički je vezana s kompaktnim visokotlačnim kontejnmentom. Izjednačava-

njem tlaka unutar posude i kontejnmenta prestaje gubitak hladioca, a kako se ostatna toplina uklanja putem EHRS-a, tlak reaktora se snižava i ispod tlaka kontejnmenta pa dolazi i do reverzije protoka, tj. popunjavanja posude iz kontejnmenta. Osim toga i hladioc koji se kondenzira u bazenima za redukciju tlaka kontejnmenta koristi se za poplavljanje bazena za smještaj reaktorske posude. Upravo tim karakteristikama omogućena je dugotrajna (nekoliko dana ili tjedana) poplavljenost jezgre (i samim time njezino hlađenje) bez potrebe za bilo kakvim korektivnim postupcima osoblja elektrane.

3.3. Licenciranje

Najvažniji prioritet projekta je postupak predlicenciranja koji je trenutačno u postupku pred U.S. NRC [18]. Ovaj postupak započet je krajem 2002. g. s planiranim trajanjem približno do kraja 2005. g., a usredotočen je na dva područja:

1. NRC ocjena plana testiranja, kojem je cilj da istraži specifične aspekte integralne konfiguracije IRIS-a, da potvrdi performanse novih komponenti (npr., aksijalnih pumpi i unutrašnjeg mehanizma kontrolnih

šipki), ispita njihovo međudjelovanje, te potvrdi valjanost analitičkih metoda i njihovu sposobnost da točno predvide odziv IRIS-a na očekivane tranzijente i akcidentne sekvence.

2. NRC ocjena IRIS-ovog pristupa s ciljem poboljšanog i proširenog licenciranja, npr. takvog koje bi omogućilo prethodno spomenuto eliminiranje zahtjeva za hitnu evakuaciju izvan kruga elektrane.

Licenciranje bez potrebe za planom evakuacije izvan kruga elektrane zahtijeva razradu i proširenje trenutačnog zakonodavstva. U SAD, IRIS istražuje moguće pristupe u okviru postupka predlicenciranja s U.S. NRC, koji je trenutačno u toku, s planiranim dovršenjem do kraja 2005. g. ili početka 2006. g., a također su uspostavljani kontakti s IAEA za suradnju na ovom području.

4. EKONOMIJA I PERSPEKTIVE PRIMJENE

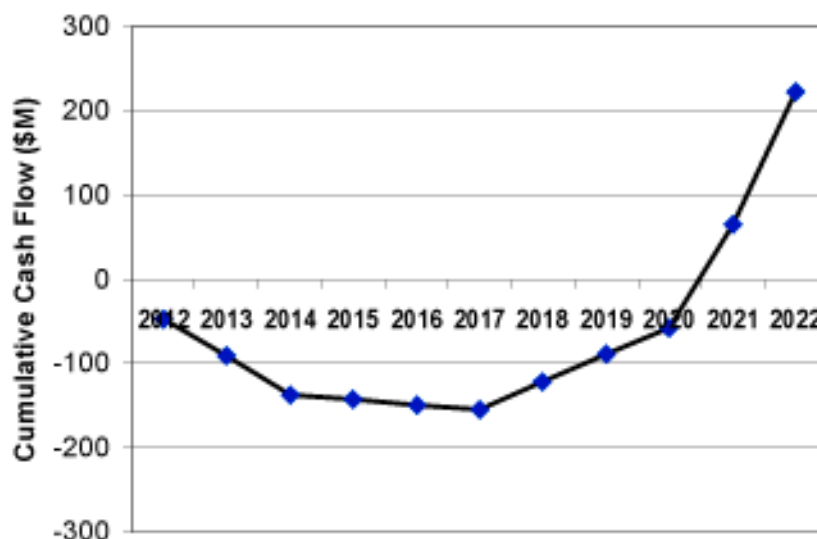
Ekonomija malih i srednjih modularnih reaktorskih sustava sadrži dosta neodređenosti s obzirom na ograničenu bazu podataka, odnosno prethodna iskustva iz prakse. Konvencionalno načelo da veća jedinica znači nižu jediničnu cijenu kada je riječ o modularnim jedinicama

Tablica 6. Vremenski plan izgradnje elektrane s 3 IRIS modula

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Modul 1	*			✓						
Modul 2				*			✓			
Modul 3							*			✓

* početak gradnje

✓ prva godina pogona



Slika 13. Kumulativni protok kapitala za elektranu od 1000 MWe ukupne instalirane snage, s 3 IRIS modula. (Vrijeme izgradnje 3 godine, pomak između jedinica 3 godine, kamate za 100% financiranje duga uzete u obzir)

ne može se u potpunosti primijeniti. Cilj IRIS-a je da do maksimuma iskoristi prednosti modularnosti, uključujući serijsku proizvodnju komponenti, izgradnju identičnih modula, kratko vrijeme izgradnje (planirano vrijeme izgradnje za prvi IRIS reaktor je ispod 5 godina, a 36 mjeseci za iduće), optimizirano održavanje (smanjen broj osoblja), smanjenu potrebu za infrastrukturom, jednostavna konačna razgradnja, visoku pouzdanost, te smanjen financijski rizik.

Ocjena ekonomičnosti provedena "top-down" metodom rezultirala je u procjeni koštanja proizvedene električne energije od 3.2 – 3.4 ¢/kWh (uključujući troškove izgradnje i financiranja, odlaganja istrošenog goriva, kao i troškove konačne razgradnje), čime bi IRIS bio potpuno kompetitivan drugim izvorima električne energije u svim regijama svijeta [19].

Naročito za manje elektroenergetske sustave kao i za zemlje s ograničenim investicijskim kapitalom, modularnost odnosno manje pojedinačne jedinice imaju prednost u manjem finacijskom opterećenju. U tablici 6. dan je kao primjer vremenski plan modularne gradnje 3 IRIS reaktora ukupne instalirane snage 1005 MWe uz pretpostavku minimalnog zaduživanja. Izgradnja se provodi s pomakom od tri godine između jedinica, tako da svaka dovršena jedinica ulazi u pogon i počinje donošati prihod istodobno s početkom izgradnje (i financiranja) iduće jedinice. To znatno smanjuje potrebe za financiranjem i poboljšava protok kapitala, te smanjuje ukupni financijski rizik. Kao što je prikazano na slici 13, ukupni kumulativni protok kapitala (tj. maksimalna zaduženost) u ovom slučaju ne prelazi \$160M, iznos koji je prihvatljiv i dohvatljiv čak i za tržišta u razvoju s vrlo ograničenim sredstvima za investicije.

5. ZAKLJUČAK

IRIS je napredni modularni reaktor srednje snage i integralne konfiguracije, koji uvodi mnoga inovativna rješenja, no pritom ostaje čvrsto baziran na dokazanoj tehnologiji tlakovodnih reaktora. Njegove izvanredne sigurnosne karakteristike, ostvarene su dosljednom primjenom principa projektom ostvarene sigurnosti (safety-by-design™), što može omogućiti i poboljšano licenciranje sa znatnim socio-ekonomskim prednostima. Pojednostavljeni dizajn, optimizirano održavanje i pogon te modularna izvedba doprinose smanjenju troškova izgradnje, proizvodnje energije, kao i zahtjeva za infrastrukturu.

IRIS Konzorcij, kroz svoj oblik međunarodnog partnerstva, nudi jedinstvenu priliku zemljama zainteresiranim za uvođenje naprednih reaktora, da sudjeluju u razvoju IRIS-a i po potrebi prilagode projekt svojim specifičnim potrebama. On omogućava zajednički udio te smanjenje troškova razvoja, kao i troškova izvedbe kroz serijsku proizvodnju komponenti.

Plan IRIS-a da bude spreman za izgradnju u periodu od 2012. – 2015. god. poklapa se sa zahtjevima onih zema-

lja koje očekuje nedostatak energije u idućem desetljeću. Procijenjeni trošak proizvodnje električne energije čini IRIS potpuno kompetitivnim drugim izvorima energije, dok njegova modularnost omogućava postupno dodavanje novih kapaciteta uvođenjem bilo jednostrukih jedinica (335 MWe) ili dvostrukih jedinica (670 MWe). Postupno uvođenje novih jedinica povezano s kratkim vremenom izgradnje omogućava poboljšani protok kapitala i smanjuje ukupno zaduženje do nivoa prihvatljivog čak i za vrlo ograničena raspoloživa financijska sredstva (reda veličine \$ 160 M za elektranu instalirane snage 1000 MWe, kao što je prethodno ilustrirano).

Može se zaključiti da je IRIS idealan za zemlje-elektroprivrede s ograničenim mogućnostima financiranja, kao i za manje elektroenergetske sustave koji zahtijevaju postupno dodavanje novih kapaciteta tijekom idućeg desetljeća.

LITERATURA

- [1] World list of nuclear power plants, *Nuclear News*, 47, No. 3 (March 2004), pp. 35-60
- [2] DOE, Annual Energy Review. DOE Energy Information Agency, DOE-EIA-0384, 2004
- [3] DOE, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. U.S. Department of Energy, GIF-02-00, December 2002
- [4] M. D. CARELLI, IRIS: "A global approach to nuclear power renaissance", *Nuclear News*, 46, No. 10 (Sep. 2003), pp. 32-42
- [5] B. PETROVIC, M. D. CARELLI, "IRIS Project Update: Status of Design and Licensing Activities," *Proc 5th Intl. Conf. on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids*, Dubrovnik, Croatia, May 16-20, 2004.
- [6] M. D. CARELLI, et al., "The Design and Safety Features of the IRIS Reactor", *Nucl. Eng. Design*, 230, (2004), pp. 151-167
- [7] J. M. COLLADO, 2003. "Design of the Reactor Pressure Vessel and Internals of the IRIS Integrated Nuclear System", *Proc. Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants ICAPP '03*, Cordoba, Spain, May 4-7, 2003.
- [8] B. PETROVIC, F. FRANCESCHINI, Fuel Management Approach in IRIS Reactor, *Proc. LAS-ANS Intl. Conf.*, Cancun, Mexico, July 11-16, 2004. (Invited)
- [9] L. CINOTTI, M. BRUZZONE, N. MEDA, G. CORSINI, L. E. CONWAY, C. LOMBARDI and M. E. RICOTTI, 2002. "Steam Generator of the International Reactor Innovative and Secure," *Proc. 10th Int. Conf. on Nuclear Engineering ICONE-10*, Arlington, USA, April 14-18, 2002.
- [10] J. M. KUJAWSKI, D. M. KITCH and L. E. CONWAY, 2002. "The IRIS Spool-type Reactor Coolant Pump", *Proc. 10th Int. Conf. on Nuclear Engineering ICONE-10*, Arlington, USA, April 14-18, 2002.
- [11] A. C. O. BARROSO, B. D. BAPTISTA, F. I. D. ARONE, L. A. MACEDO, P. A. B. SAMPAIO and M. MORAES, 2003. "IRIS Pressurizer Design", *Proc. Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants ICAPP '03*, Cordoba, Spain, May 4-7, 2003.

- [12] R. S. McHENRY, T. J. MOORE, J. H. MAURER and N. E. TODREAS, 1997. "Surveillance Strategy for an Extended Operating Cycle in Commercial Nuclear Reactors", *Proc. 5th Int. Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety NUTHOS-5*, Beijing, China, April 1997.
- [13] M. GALVIN, N. E. TODREAS and L. E. CONWAY, 2003. "Maintenance Cycle Extension in the IRIS Advanced Light Water Reactor Plant Design." *Nucl. Technol.*, Sep. 2003, to appear.
- [14] R. BOROUGHS, J. WILSON, W. EBERLY, J. McCLANAHAN and G. BOLES, 2003. "Enabling 48-Month Maintenance Intervals in IRIS", *Proc. GENES4/ANP2003*, Kyoto, Japan, Sep. 15-19, 2003.
- [15] D. FINNICUM, A. MAIOLI, Y. MIZUNO, J. VIAIS, G. MENDOZA, G. ALONSO, "IRIS Preliminary PRA Analysis", *Proc. GLOBAL 2003*, New Orleans, LA, USA, November 16-20, 2003
- [16] A. MAIOLI, D. J. FINNICUM, and Y. KUMUAGAI, "IRIS Simplified LERF Model", *Proc. of ANES 2004 Conference*, Miami, FL, October 3-6, 2004
- [17] International Atomic Energy Agency (IAEA), Guidance for the Evaluation of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. Report of Phase 1A of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), IAEA-TECDOC-1362, June 2003
- [18] NRC, 2002. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants. Regulatory Guide *NUREG-0800*, Rev. 02/2002.
- [19] K. MILLER, "IRIS Economics: A Sensitivity Review", *Proc. GLOBAL 2003*, New Orleans, LA, USA, November 16-20, 2003

IRIS – ADVANCED INTEGRAL NUCLEAR REACTOR WITH MODULAR CONSTRUCTION

Main characteristics of the IRIS reactor (International Reactor Innovative and Secure) are presented in this paper. IRIS is an integral, modular, medium power (335 MWe) light water reactor. The IRIS design is being developed by an international consortium led by Westinghouse Electric Co. that includes over twenty organizations from ten countries. The primary objective of this project is to develop a safe, reliable and economical small-to-medium-power reactor. The paper describes the integral reactor vessel that beside the reactor core, moderator, control rods and neutron reflector also incorporates steam generators, reactor coolant pumps, control rod drive mechanisms and the pressurizer. The unique IRIS safety characteristics, achieved through its "safety-by-design" approach, have made it possible to employ simpler and smaller passive safety systems.

The improved safety and reliability, combined with the possibility of sequential construction of new units and incremental addition of new generating capacity, requiring relatively modest financial resources, make IRIS particularly attractive for smaller electricity grids.

IRIS – DER FORTGESCHRITTENE INTEGRALE ATOMKERNREAKTOR IN MODULARAUSFÜHRUNG

In diesem Artikel sind Hauptmerkmale des Reaktors IRIS (englische Abkürzung: International Ractor Innovative and Secure) dargestellt. IRIS ist ein fortgeschrittener, integraler, modular ausgeführter Leichtwasser-Kernreaktor mittlerer Leistung (335 MWe). Das Projekt des IRIS-Reaktors wurde von einem internationaler Bund von zwanzig Unternehmen aus zehn Ländern unter Führung der Westinghouse-Gesellschaft entwickelt. Vorrangiges Bestreben des Projektes ist die Schaffung eines sicheren, zuverlässigen und wirtschaftlich günstigen Reaktors kleiner bis mittlerer Leistung. Beschrieben im Artikel ist ein integrales Reaktorgefäß, welches neben dem Reaktorkern, dem Moderator, den Kontrollstäben und dem Abschirmschild auch Dampferzeuger, Pumpen und Druckbehälter beinhaltet. Einheitliche Sicherheitsmerkmale (englischer Termin: "safety-by-design") haben kleinere und einfachere passive Sicherheitssysteme möglich gemacht. Wegen der verbesserten Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit sowie wegen der Möglichkeit des schrittweisen Ausbaus neuer Erzeugungseinheiten bei verhältnismässig niedrigen Kapitalanlagen, ist IRIS für kleinere elektroenergetische Systeme besonders verlockend.

Naslov pisaca:

Prof. dr. sc. Nikola Čavlina, dipl. ing.
docent dr. sc. Davor Grgić, dipl. ing.
prof. dr. sc. Dubravko Pevec, dipl. ing.
Fakultet elektrotehnike i računarstva,
Unska 3,
10000 Zagreb, Hrvatska

dr. sc. Mario Carelli, dipl. ing.
dr. sc. Bojan Petrović, dipl. ing.
Pittsburgh, SAD

Uredništvo primilo rukopis:
 2004 – 09 – 28.