

REPUBLIKA SLOVENIJA
**MINISTRSTVO ZA GOSPODARSKE
DEJAVNOSTI**

1000 LJUBLJANA, Kotnikova ul. 5

tel.: (061) 17 83 287; Fax: (061) 13 26 094

**STRATEGIJA RAVNANJA Z IZRABLJENIM
JEDRSKIM GORIVOM**

Ljubljana, julij 1996

Vsebina

1. UVOD	3
2. OPREDELITEV TEHNOLOŠKIH MOŽNOSTI ZA RAVNANJE Z IZRABLJENIM GORIVOM IN VRAO	4
2.1 KRATEK PREGLED MEDNARODNE PRAKSE	7
3. MERILA ZA OVREDNOTENJE IN IZBOR STRATEGIJE ZA RAVNANJE Z IZRABLJENIM JEDRSKIM GORIVOM IN VRAO	9
4. STRATEGIJA RAVNANJA Z IZRABLJENIM JEDRSKIM GORIVOM V REPUBLIKI SLOVENIJI	10
4.1 NUKLEARNA ELEKTRARNA KRŠKO	11
4.1.1 <i>Predelava goriva</i>	11
4.1.2 <i>Možnost trajnega izvoza VRAO v tretje države</i>	12
4.1.3 <i>Povečanje zmogljivosti skladiščenja</i>	12
4.1.4 <i>Razgradnja</i>	15
4.2 RAZISKOVALNI REAKTOR TRIGA	16
5. TERMINSKI NAČRT STRATEGIJE	17
6. EKONOMSKI VIDIKI	18
7. ZAKLJUČEK	19
8. VIRI	20

1. Uvod

Agencija za radioaktivne odpadke je zadolžena za pripravo in izvedbo različnih dejavnosti v zvezi s trajnim odlaganjem radioaktivnih odpadkov. Sem sodijo tudi visoko radioaktivni odpadki (VRAO). Izrabljeno jedrsko gorivo (IJG) lahko uvrstimo med visoko radioaktivne odpadke, če ga ne nameravamo več predelati in koristne produkte ponovno uporabiti. Odločitev o tem je pomembna, zato se ponavadi take odločitve sprejemajo na državnem nivoju.

Januarja letos je Državni zbor Republike Slovenije sprejel Resolucijo o strategiji rabe in oskrbe Slovenije z energijo, v kateri je določena dolgoročna strateška usmeritev glede jedrske energije. Na tej osnovi se načrtuje na varen, ekološko in ekonomsko sprejemljiv način opustiti proizvodnjo električne energije na osnovi jedrske energije, ne načrtuje se izgradnja novih jedrskih elektrarn. Nadaljnje obratovanje in postopno ustvarjanje pogojev za varno razgradnjo Nuklearne elektrarne Krško pa bo definiral nacionalni energetski program.

V tem smislu je pomembno, da Slovenija oblikuje in sprejme tudi dolgoročni program ravnanja z izrabljenim jedrskim gorivom, ki ga doslej še nima. V preteklih letih je Agencija RAO pripravila nekaj študij v zvezi s to problematiko. Zaradi omejenih finančnih sredstev se je delo na tej problematiki v letu 1995 prekinilo, zato vsi aspekti ravnanja niso obdelani tako, kot je bilo načrtovano. Kljub temu lahko dosedanji rezultati služijo kot strokovna podlaga za razpravo in oblikovanje končne strategije ravnanja z izrabljenim gorivom.

Kratek povzetek rezultatov dosedanjega dela, narejen na osnovi študij IJS, IBE in GZL (ref. 1, 2 in 3), je podan v nadaljevanju. V njem najprej predstavljamo različne tehnološke možnosti za ravnanje z IJG. V drugem razdelku obravnavamo merila, po katerih v mednarodni praksi ovrednotijo in izberejo strategijo za ravnanje z IJG in VRAO. Na osnovi teh meril je bil izbran in izdelan okvirni predlog ravnanja z IJG in VRAO za Republiko Slovenijo za oba jedrska objekta. Terminski načrta strategije je zaradi nekaterih nedefiniranih vhodnih pogojev v sedanjem trenutku težko pripraviti, dosedanji rezultati pa so opozorili na nekatere kritične termine, do katerih je potrebno izbrati določeno možnost. Navajamo jih kljub temu, da so že v sedanjem trenutku potrebni kritične presoje in revizije. Na koncu so navedeni še ekonomski vidiki različnih tehnoloških pristopov.

Pri izdelavi Strategije ravnanja z izrabljenim jedrskim gorivom so sodelovali: nosilec naloge je bila Agencija za radioaktivne odpadke in Ministrstvo za gospodarske dejavnosti v sodelovanju z Institutom Jožef Stefan, Republiško upravo za jedrsko varnost in Nuklearno elektrarno Krško.

2. Opredelitev tehnoloških možnosti za ravnanje z izrabljenim gorivom in VRAO

Gorivo v jedrskem reaktorju se sčasoma izrabi, zato ga odstranimo iz sredice in zamenjamo s svežim. Običajno vsako leto v lahkovodnih reaktorjih, kakršen je tudi NE Krško, zamenjajo približno četrtno goriva. Delež zamenjanega goriva je odvisen od tipa in obogatitve goriva, sheme polnitve, dolžine ciklusa, moči in še nekaterih drugih faktorjev. Pri izgorevanju se spreminja njegova izotopska sestava. Tako nastanejo pri običajno zgorelem gorivu lahkovodnega reaktorja cepitveni produkti (2.9 %), aktinidi (0.1%), plutonij (1%) in uran (96%), od tega urana-235 približno 1%. Stranski produkt zgorevanja goriva so tudi aktivacijski produkti, ki so aktivirani atomi reaktorskih gradiv in njihovih legur, dodatkov ali nečistoč (npr. aktivacijski produkti konstrukcije gorivnih elementov). Za izrabljeno gorivo je značilno:

1. visoka beta, gama in alfa aktivnost
2. visoka radiotoksičnost
3. znatna toplotna moč.

Po odstranitvi iz reaktorja ima izrabljeno gorivo lastnosti, ki narekujejo točno določen način hranjenja in ravnanja. Med lastnostmi so najpomembnejše reaktivnost, aktivnost in generacija toplote, ki so odvisne od obogatitve in vrste goriva ter od zgorelosti. Izrabljeno gorivo zato takoj po odstranitvi iz sredice hranijo v bazenu za izrabljeno gorivo, kjer je gorivo vstavljeno v posebna stojala - rešetke, ki so narejene iz nerjavečega jekla. Nekaj metrov debela plast vode predstavlja učinkovito zaščito pred sevanjem, hkrati pa odvaja proizvedeno zakasnelo toploto. V bazenu ob reaktorju hranijo izrabljeno gorivo nekaj let po odstranitvi iz sredice, nadaljnje ravnanje z njim pa zavisi od strategije, ki jo posamezna država izbere glede na njene specifične značilnosti.

Glede globalne strategije ravnanja z izrabljenim gorivom sta se v svetu izoblikovala dva pristopa: **neposredno odlaganje gorivnih elementov** ali **predelava**. Pri prvem izrabljeno gorivo takoj po odstranitvi iz reaktorja dobi status visoko radioaktivnega odpadka in čaka na končno odlaganje v vmesnem oz. prehodnem skladišču. Pri predelavi pa v specializiranih tovarnah iz izrabljenega goriva odstranijo neuporabne snovi ter preostanek, sestavljen iz izotopov urana in plutonija, predelajo v mešano oksidno gorivo (MOX), ki ga je mogoče ponovno uporabiti kot gorivo v reaktorju. Pri predelavi izrabljenega goriva nastane nekaj visoko radioaktivnih odpadkov, ki so tako kot izrabljeno gorivo zelo dolgoživi in oddajajo precejšnje količine toplote. Ker so večinoma v tekoči obliki, jih že v tovarni imobilizirajo z vlivanjem v steklo (vitrificiranjem), nadaljnje ravnanje z njimi pa je podobno, kot pri neposrednem odlaganju izrabljenega goriva.

V svetu obstaja še en pristop glede strategije ravnanja z izrabljenim jedrskim gorivom: to je tako imenovano **odloženo reševanje problema VRAO** (deferred decision). V tem primeru se končna odločitev o ravnanju z IJG in VRAO (predelava ali neposredno odlaganje) preloži za nekaj deset let. Do izbora trajne rešitve odlaganja se shranjuje izrabljeno jedrsko gorivo v prehodnih skladiščih. Tako se pridobi potreben

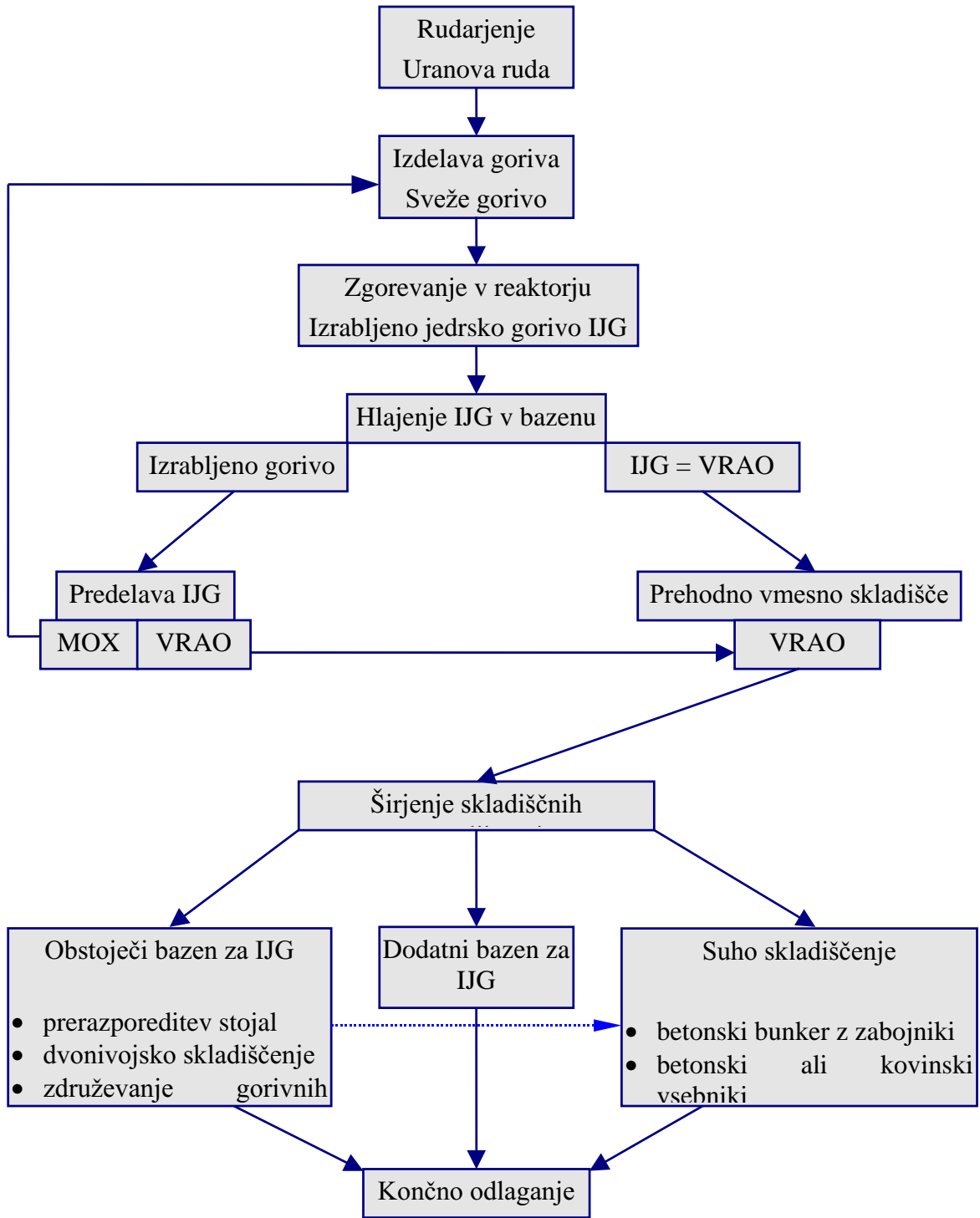
čas za razmislek, hkrati pa se lahko upošteva tudi dodatna tehnična spoznanja in rešitve.

Končno odlaganje visoko radioaktivnih odpadkov je zaradi dolgoživosti in njihove visoke aktivnosti zapleten, a obvladljiv tehnološki problem. Ta čas še nikjer v svetu, predvsem zaradi nasprotovanja javnosti, ni odlagališča visokoradioaktivnih odpadkov, čeprav ga že marsikje načrtujejo ter izvajajo raziskave in pripravljala dela. Ponekod obratujejo tudi podzemni raziskovalni laboratoriji, kjer potekajo raziskave v globinah, kjer bodo predvidoma odlagališča. Skupna značilnost vseh nacionalnih programov je odlaganje v globokih geoloških plasteh, kjer samo geološko okolje predstavlja glavno dolgoročno prepreko za širjenje radioaktivnih snovi v človekovo življensko okolje. Obdobje, za katero mora biti dokazana varnost odlagališča, je vsaj 10000 let. V tem času pa večina umetno proizvedenih materialov že razpade in ne more nuditi dolgotrajne zaščite. Nekatere geološke strukture kot so granit, bazalt, tuf, glina in sol, pa so stabilne že več milijonov let in so tako najprimernejše za končna odlagališča izrabljenega goriva in VRAO. Temeljni koncept predvideva vstavljanje izrabljenih gorivnih elementov v kovinske vsebnike, njihovo namestitve v jaškaste odprtine na dnu odlagalnega rova globoko pod zemljo in zapolnitev vmesnega prostora s primernim polnilom.

Ker odlagališč še ni, se veliko število jedrskih elektrarn po vsem svetu srečuje s problemom pomanjkanja prostora v bazenih za izrabljeno gorivo. Težave skušajo reševati na različne načine, najpogosteje s **povečevanjem kapacitet obstoječih bazenov**. To je mogoče doseči z zgoščevanjem rešetke v bazenu (reracking), prehodom na dvonivojsko skladiščenje (double tiering) ali s premeščanjem gorivnih palic iz okvirov gorivnih elementov v oblike z manjšim volumnom (konsolidacija). V primeru, ko razširitev kapacitet z omenjenimi metodami ni zadostna, išče večina držav rešitev z gradnjo **prehodnih (vmesnih) skladišč**, ki so lahko ob reaktorju ali na neodvisni lokaciji in so namenjena eni sami ali več elektrarnam, pogosto pa so namenjena zbiranju goriva iz vse države. S tehnološkega stališča ločimo mokro in suho skladiščenje.

Princip mokrega prehodnega skladišča je povsem enak, kot v bazenih za izrabljeno gorivo ob reaktorju. Zanj je značilna preizkušena tehnologija, sorazmerno visoka cena pa se z večanjem kapacitet znižuje in postaja primerljiva s cenami drugih tehnologij. Suho skladiščenje pomeni alternativo skladiščenju v bazenih z vodo. Uporabno je za skladiščenje ob reaktorju in na neodvisni lokaciji. Za suho skladiščenje izrabljenega goriva se v svetu uporabljajo betonski bunkerji ali moduli, v katere so položeni betonski ali kovinski zabojniki. Ta način je manj fleksibilen, kot shranjevanje izrabljenega goriva v večnamenske vsebnike. Ti so narejeni iz kovine ali betona in so namenjeni tako transportu kot tudi shranjevanju, nekateri pa tudi končnemu odlaganju. Izrabljeno gorivo se v prehodnem skladišču hrani nekaj deset let, nato se bo preneslo v končno odlagališče. Shematski prikaz gorivnega cikla s poudarkom na posameznih fazah ravnanja z jedrskim gorivom je prikazan na Sliki 1.

Slika 1: SHEMA JEDRSKEGA GORIVNEGA CIKLA



2.1 Kratek pregled mednarodne prakse

Med uporabnicami jedrske energije sta glede ravnanja z izrabljenim jedrskim gorivom danes v uporabi dve opciji: predelava in direktno odlaganje izrabljenega goriva. Nekaj držav pa se je odločilo tudi za opcijo odloženega reševanja problema IJG in VRAO. Skupno vsem programom pa je gradnja ali povečanje zmogljivosti za prehodno skladiščenje goriva v predelani ali nepredelani obliki za obdobje 10 do 50 let, in sicer osrednje za celo državo ali na lokaciji elektrarne, če je reaktorjev manj.

Države, ki imajo obrate za predelavo goriva (Francija, Japonska, Velika Britanija, Italija in države bivše Sovjetske zveze), to možnost večinoma izkoriščajo, še nepredelano gorivo in proizvedene odpadke pa shranjujejo v prehodnih skladiščih. Predvsem Francija in Japonska načrtujeta predelavo vsega izrabljenega goriva, kar je vezano tudi na razvoj oplodnih reaktorjev. Ta poteka tako rekoč samo še v teh dveh državah.

Nekatere države (Belgija, Nizozemska, Švica, Španija), ki nimajo lastnih zmogljivosti za predelavo goriva, izvajajo predelavo v tujini. Pri teh državah sta opazna upočasnjevanje oziroma zmanjševanje načrtovanih količin za predelavo in ponovna preučitev možnosti za direktno odlaganje.

V Nemčiji je predelava zakonsko predpisana, lastnih zmogljivosti za to pa nimajo. Zaradi tega poteka akcija, da bi se kot alternativa dovolilo direktno odlaganje. Do končne odločitve se gorivo shranjuje v dveh osrednjih prehodnih skladiščih v shranjevalno - transportnih vsebnikih na lokaciji Gorleben ter Ahaus.

Tri srednjeevropske države (Češka, Slovaška, Madžarska) imajo kljub podpisanim pogodbam o vračanju goriva v Rusijo, ki je njegov izdelovalec, težave. Razvijajo novo strategijo ravnanja z izrabljenim jedrskim gorivom in VRAO. Kot začasno rešitev načrtujejo prehodna skladišča na neodvisni lokaciji za obdobje do 50 let. Začasno pa je Češka že zgradila suho prehodno skladišče na lokaciji elektrarne Dukovany, kjer uporabljajo shranjevalno - transportne vsebnike.

Skandinavske države so se odločile za direktno odlaganje po razmeroma dolgotrajnem prehodnem skladiščenju na osrednji lokaciji. Tako ima Švedska bazenski tip osrednjega prehodnega skladišča (CLAB), ravno tako Finska za del izrabljenega jedrskega goriva. Izrabljeno gorivo iz ruskih tipov elektrarn (VVER) se je v celoti vračalo v Rusijo do tega leta. Nedavno pa je finski parlament sprejel poseben akt, s katerim so z letošnjim letom prepovedali pošiljanje izrabljenega jedrskega goriva v tujino. Zato je bila ustanovljena posebna agencija, ki naj bi poskrbela za končno odlaganje izrabljenega goriva iz vseh elektrarn.

ZDA ne izvajajo predelave; gorivo se začasno skladišči ob elektrarnah in na neodvisnih lokacijah. Prevladuje suho skladiščenje v betonskih modulih (bunkerjih) ali kovinskih vsebnikih. Pred dokončnim odlaganjem bodo del goriva shranjevali v osrednjem suhem skladišču MRS (Monitored Retrievable Storage), ko to bo. Dokončno odlagališče načrtujejo na lokaciji Yucca Mountain na poligonu v Nevadi, kjer potekajo tudi že prve raziskave.

Kanada se je odločila za odloženo reševanje problema izrabljenega jedrskega goriva. Tako se IJG skladišči bodisi v sedanjih bazenih za izrabljeno gorivo bodisi ga že ohlajenega prenesejo včasne betonske vsebnike, ki niso nujno ob elektrarnah. Po letu 2025 nameravajo globinsko odložiti predelano ali nepredelano izrabljeno gorivo v globoke plasti magmatske kamenine.

Pregled mednarodne prakse različnih strategij ravnanja z izrabljenim jedrskim gorivom je podan v naslednji preglednici.

Preglednica 1: Pregled mednarodne prakse ravnanja z IJG

Država	Strategija	Prehodno skladišče	Končno odlagališče	Raziskave za odlagališče
Belgija	predelava	ni	Ni	podzemni mednarodni laboratorij (Mol)
Francija	predelava	da (bazeni in bunker)	Ni	v načrtovanju 2 podzemna laboratorija
Finska	direktno odlaganje	da (bazen)	V načrtovanju	raziskave in projekti
Japonska	predelava	da (bazeni)	V načrtovanju	v načrtovanju podzemni laboratorij
Kanada	odloženo reševanje	da (vsebniki)	V načrtovanju	raziskave in projekti
Litva	odloženo reševanje	da (vsebniki in bazen)	Ni	Ni
Mehika	odloženo reševanje do 2030	da (bazeni in suho skladiščenje)	Ni	evidentiranje potencialnih lokacij
Nemčija	predelava	da (vsebniki)	V načrtovanju (Gorleben)	raziskave v opuščnem rudniku Asse
Španija	direktno odlaganje in predelava	v načrtovanju (vsebniki)	Faza idejnih projektov	raziskave in projekti
Švedska	direktno odlaganje	da (bazen)	V načrtovanju	podzemni laboratorij (Aspo)

Švica	predelava	v načrtovanju	V načrtovanju	podzemni - mednarodni laboratorij (Grimsel)
VB	predelava	da (bazeni in bunkerji)	Ni	raziskave in projekti
ZDA	direktno odlaganje	da (bazeni, vsebniki in bunkerji)	V načrtovanju (Yucca Mountain)	raziskave in projekti

3. Merila za ovrednotenje in izbor strategije za ravnanje z izrabljenim jedrskim gorivom in VRAO

Pri izboru določene tehnologije za shranjevanje in odlaganje izrabljenega goriva in VRAO je treba upoštevati pogoje, ki izhajajo iz posebnosti lokacije in vrste VRAO, ter pogoje, ki jih zahtevajo trenutno dosegljive tehnološke rešitve. Konkretno se pri iskanju ustreznih rešitev za shranjevanje in odlaganje v mednarodni praksi upoštevajo naslednja merila:

Splošna:

- gorivni cikel (odprt - direktno odlaganje po določenem obdobju skladiščenja; zaprt - predelava in uporaba MOX goriva v gorivnem ciklu, skladiščenje preostalega VRAO in njegovo odlaganje)
- količina izrabljenega goriva
- nacionalna zakonodaja
- lokacija skladiščenja
- tip goriva in drugih VRAO (radiološke, fizične in kemične lastnosti)

Projektna:

- reference (že licencirane rešitve)
- izkušnje pri gradnji in obratovanju
- tehnični vidiki
- cena, kompleksnost in QA v vseh fazah projekta (med projektiranjem in konstrukcijo, med obratovanjem in vzdrževanjem ter med razgradnjo)
- čas gradnje
- fleksibilnost (razširitve, modularnost, možnost skladiščenja različnih VRAO)
- kompatibilnost z dano tehnologijo goriva
- varnost med obratovanjem in med prehodnimi pojavi (podkritičnost, odvajanje toplote, zaščita)
- zahteve po kadrih
- monitoring in inspekcije (status odpadkov, emisije)
- dostopnost goriva

-
- fizično varovanje
 - radioaktivni odpadki, ki nastaneji pri obratovanju in razgradnji
 - doze, ki jih prejmejo operaterji in prebivalstvo
 - drugi vplivi na okolje (velikost, videz)

Pri izbiri tehnološke rešitve je poleg projektnih meril potrebno upoštevati tudi:

- raziskave končnega odlaganja
- začasno skladiščenje naprednih tipov goriva, goriva z visoko zgorelostjo in poškodovanega goriva, posebno pomembni so izračuni kritičnosti
- podaljšanje časa prehodnega skladiščenja
- avtomatizacija in robotizacija vseh postopkov ravnanja z VRAO
- informacijski sistemi o VRAO

Navedena merila so splošna in so upoštevana tudi v primeru opredelitve okvirnega predloga strategije v Republiki Sloveniji.

4. Strategija ravnanja z izrabljenim jedrskim gorivom v Republiki Sloveniji

V Republiki Sloveniji proizvaja izrabljeno gorivo Nuklearna elektrarna Krško in raziskovalni reaktor TRIGA v Podgorici pri Ljubljani. Zaradi pomanjkanja ustrezne strategije se problematika ravnanja z IJG rešuje sproti v okviru operativnih potreb. V nadaljevanju so navedene možnosti, ki bi bile sprejemljive kot strategija ravnanja z izrabljenim gorivom iz NE Krško in iz reaktorja TRIGA.

Republiki Sloveniji se priporoča odloženo reševanje problema VRAO (deferred decision). V vmesnem obdobju se bo problem VRAO reševal z razširitvijo trenutnih skladiščnih zmogljivosti in/ali s prehodnim skladiščenjem izrabljenega goriva. Priporočilo je utemeljeno na izkušnjah držav, ki so podane v preglednici 1 na strani 8. Izbor trajne rešitve končnega odlaganja VRAO se lahko odloži do približno leta 2020. V primeru predčasnega zaprtja leta 2006 ali kasneje, se ustrezno premakne čas odločitve o trajni rešitvi. Izgradnja končnega odlagališča in potrebna dovoljenja za njegovo obratovanje lahko preložimo do leta 2050, kar daje dovolj časa za iskanje dokončnih rešitev in za morebitno mednarodno sodelovanje na tem področju.

Obrazložitev in utemeljitev tega predloga je podana v nadaljevanju.

4.1 Nuklearna elektrarna Krško

Gorivo v NEK je 3-5% obogaten uranov dioksid, sintran v gorivne tablete, ki so vložene v gorivne palice iz cirkonijeve zlitine. Gorivne palice so v snopih po 235 palic sestavljene v gorivne elemente. Poleg gorivnih palic je v gorivnem elementu še po eno mesto namenjeno instrumentacijskemu vodilu ter 20 mest, ki so namenjene regulacijskim palicam.

V reaktorski sredici NEK je skupno 121 gorivnih elementov z 49,9 tonami jedrskega goriva. Pri menjavi goriva letno odstranijo iz reaktorske sredice približno 32 gorivnih elementov, v primeru predvidenega povečanja moči pa bi število naraslo na 36 gorivnih elementov. Ostalo gorivo se prerazporedi, na izpraznjena mesta pa vstavi sveže gorivne elemente. Reaktorski gorivni cikel gorivnega elementa tako v celoti traja približno od tri do štiri leta. Izrabljeno gorivo iz sredice se namesti v bazen za izrabljeno gorivo, v katerem je 828 mest za skladiščenje gorivnih elementov. Trenutno se v bazenu nahaja 470 izrabljenih gorivnih elementov s skupno maso 183,7 ton kovinskega urana. Ker mora biti v bazenu zaradi varnostnih razlogov vselej na voljo prostor za vložitev celotne sredice, lahko približno ocenimo, da bi obstoječa zmogljivost bazena za izrabljeno gorivo pri sedanji dinamiki polnjenja bazena zadoščala do leta 2003. Ob predpostavki nadaljnjega obratovanja do konca predvidene življenjske dobe NE Krško (do leta 2023) lahko pričakujemo skupno 1500 do 1600 gorivnih elementov, kar znaša od 615 do 656 ton kovinskega urana oziroma v celoti s strukturami od 900 do 960 ton VRAO. Ocena upošteva tako uporabo izboljšane goriva s povečanjem končne zgorelosti kot tudi povečanje moči.

Možnosti za strategijo ravnanja z izrabljenom jedrskim gorivom so predstavljene v nadaljevanju.

4.1.1 Predelava goriva

Tako uran kot plutonij je s predelavo mogoče ekstrahirati in ponovno uporabiti (npr. kot gorivo MOX). Pri tem se je treba zavedati, da to ni trajna rešitev problema VRAO. Ustrezno obdelani ostanki predelave (vitificirani) vsebujejo VRAO in jih je treba po obdobju hlajenja trajno odložiti. Z ekonomskega stališča predelava za države z majhnim civilnim jedrskim programom trenutno ni priporočljiva, saj:

- * je cena urana izredno nizka (20,67 USD za kilogram v letu 1992 s težnjo padanja zaradi sprostitve zaloga nekdanje ZSSR),
- * bi bilo pred uporabo goriva MOX v NE Krško treba izvesti obsežne in drage varnostne analize (nevtronika sredice, termohidravlika sredice, analiza prehodnih pojavov...) ter licenciranje elektrarne za uporabo goriva MOX,
- * trenutno evropske tovarne za predelavo nimajo prostih zmogljivosti in/ali se o predelavi ne želijo pogovarjati,

* bi bilo treba v razmeroma kratkem času poiskati rešitev za odlaganje oziroma začasno skladiščenje VRAO, ki bi ostali od predelave.

Pri odločitvi o prehodnem skladiščenju goriva do približno leta 2050 možnost predelave in uporabe MOX goriva seveda ostane odprta, če se medtem spremenijo ekonomska merila.

4.1.2 Možnost trajnega izvoza VRAO v tretje države

Možnost trajnega izvoza VRAO v tretje države načeloma obstaja. Sistematičnih mednarodnih rešitev ni. Izvoz VRAO bi si Slovenija lahko zagotovila le z dvostranskimi dogovori. V skladu s svetovno prakso in z varnostno kulturo pridejo v poštev samo države, ki imajo problem shranjevanja že rešen in ki so višje razvite kot Slovenija. Po optimističnih napovedih bodo v teh državah prva trajna odlagališča pripravljena po letu 2010. V nobenem od odlagališč ne načrtujejo, da bi del zmogljivosti dali na razpolago tujim interesentom. Zato menimo, da je trajni izvoz VRAO v tretje države nerealna opcija vsaj za naslednjih 20 let.

4.1.3 Povečanje zmogljivosti skladiščenja

Tako, kot predvideva že Resolucija o strategiji rabe in oskrbe Slovenije z energijo, sta na voljo dve možnosti:

A. povečanje zmogljivosti sedanjega bazena za izrabljeno gorivo NE Krško

Zmogljivosti bazena lahko povečamo na več načinov. Trenutno so v svetu znani vsaj trije načini povečanja skladiščnih zmogljivosti: zgoščevanje rešetke v bazenu, prehod na dvonivojsko skladiščenje in rastavitev gorivnih elementov z združevanjem gorivnih palic. Obstaja še možnost, ki je specifična za NE Krško in ki bi jo lahko opredelili kot izraba še neizkoriščenega dela bazena.

A1. Izraba še neizkoriščenega dela bazena

Ker je v bazenu za izrabljeno gorivo še nekaj prostora nezasedenega s stojali za izrabljene gorivne elemente (približno tretjina prostora), namerava NEK razširiti skladiščne kapacitete z izrabo še neizkoriščenega dela bazena. Predvidevajo, da bi pridobili približno 400 novih lokacij. V ta namen bodo do konca 1.1996 izdelane analize izvedljivosti in izdelan idejni projekt. Leta 1997 naj bi bil predvidoma izbran projekt in pripravljene specifikacije za iskanje ponudnikov, izbor najboljšega ponudnika pa 1998. Sama izvedba bi bila možna v letu 1999.

A2. Zgoščevanje rešetke v bazenu (reracking)

Z uporabo borovih legur in namestitvijo dodatnih stojal je mogoče izvesti nadaljnje zgoščevanje rešetke v bazenu. Ker je bilo delno zgoščevanje rešetke (sicer brez uporabe nevtronski absorberjev) že izvedeno v fazi gradnje, se pri nadaljnjem zgoščevanju ne bodo pojavile takšne dodatne zmogljivosti, kakor jih ponavadi navajajo v literaturi. Po preliminarni oceni bi lahko s tem pridobili okrog 400 mest. Pred implementacijo bi bilo potrebno izvesti varnostne analize in preveriti izvedljivost ter verjetno povečati sedanje zmogljivosti hlajenja, čiščenja in dekontaminacije.

A3. Dvonivojsko skladiščenje (double tiering)

Za prehod na dvonivojsko skladiščenje bi bile potrebne poglobljene analize iz reaktorske fizike, strukturalne analize in seizmične analize. Ni mogoče z gotovostjo trditi, da bi tako pridobljene zmogljivosti zadoščale do konca predvidene življenske dobe elektrarne. Postopek onemogoča dostop do dela izrabljenega goriva in ima še nekaj drugih negativnih lastnosti, zato se razen v nekaterih nujnih primerih ne izvaja.¹

A4. Razstavitev gorivnih elementov z združevanjem gorivnih palic (consolidation)

Postopek konsolidacije je sicer izvedljiv, vendar tehnološko dokaj zahteven. Mnenje uporabniških krogov je, da je postopek nedodelan, predvsem se opozarja na varstvo pred sevanjem. Realna ocena stroškov ni mogoča, ker postopek konsolidacije še nikjer ni bil izveden na komercialni osnovi.

Obstaja tudi možnost kombinacije dveh opisanih opcij. (npr. zgoščevanje rešetke ter izraba še neizkoriščenega dela bazena). V tem primeru bi predvidoma skladiščne kapacitete zadoščale do konca načrtovane obratovalne dobe NE Krško. Bolj zanesljiv odgovor in ocena možnosti bo mogoča, ko bodo v NEK konec leta 1996 končali analizo izvedljivosti povečanja zmogljivosti bazena za izrabljeno gorivo.

Pri ocenjevanju smotrnosti razširjanja obstoječih skladiščnih zmogljivosti pa je treba upoštevati vsaj še naslednje dejavnike in njihove posledice:

- v vsakem primeru je pred dokončno razgradnjo elektrarne potrebno odstraniti izrabljeno gorivo in izvesti razgradnjo bazena;
- motenje obratovanja sedanjega bazena, v katerem je že gorivo, zaradi dela v ali ob bazenu;
- radiološki vidik (doze zaposlenih, dekontaminacija);
- vprašanje primernosti in fleksibilnosti tako razširjenega bazena v primeru uporabe goriva z višjo obogatitvijo oziroma goriva MOX.

¹ Kot začasna rešitev je bil uporabljen v Argentini in ZDA (ref.4).

B. Zagotovitev dodatnih zmogljivosti v suhih skladiščih

To je v svetu (zlasti v državah, ki imajo Sloveniji primerljiv jedrski program) trenutno največkrat uporabljena in najbolj zanesljiva možnost. Odpirajo se tri možnosti:

B1. osrednje (nepremično) suho skladišče na lokaciji NEK

Na lokaciji se suho skladišči izrabljeno jedrsko gorivo v odlagalnih enotah v posebnem objektu, ki zagotavlja potrebno zaščito pred sevanjem in hlajenje z naravno konvekcijo. Konstrukcija objekta je precej preprosta. Ima debele stene iz ojačanega betona, potrebne pa so dodatne instalacije za sprejem in pakiranje goriva ter za preizkus odlagalnih zabojnikov. Trenutno v svetu obstajajo različne izvedbe (betonski bunkerji, modularne enote, jaški, silosi...). Med seboj se ne razlikujejo bistveno, nekatere so na površju, druge so vkopane, variante pa se še spreminjajo in izboljšujejo.

B2. osrednje (nepremično) suho skladišče na drugi lokaciji

Gre za enak objekt kot je opisan v B1. Razlika je le v lokaciji.

B3. shranitev izrabljenega goriva v transportno - shranjevalne vsebnike²

Transportno shranjevalni vsebniki so masivne kovinske posode, ki so namenjene transportu in skladiščenju izrabljenega jedrskega goriva in drugih radioaktivnih odpadkov. Zagotavljajo kemično, mehansko, toplotno in radiološko zaščito in omogočajo odvajanje zaostale toplote med samim rokovanjem, transportom in skladiščenjem. Značilen kovinski vsebnik je visok okrog 5 m, do 2,5 m širok in poln tehta 100-125 ton. Zmogljivosti vsebnikov za gorivo iz lahkovodnih reaktorjev se gibljejo od 19 do 40 gorivnih elementov.

Za zagotovitev dodatnih zmogljivosti v suhih skladiščih ima v primerjavi z ostalimi možnostmi shranitev izrabljenega goriva v transportno - shranjevalne vsebnike naslednje prednosti:

- Vsebniki se nabavljajo po potrebi, možno je sodelovanje pri izdelovanju v RS.
- Cena vsebnikov je dokaj sprejemljiva. Na kilogram kovinskega urana bi porabili približno 80 USD (Ref. 1) v petdesetih letih skladiščenja. Če računamo, da bi imeli ob prenehanju obratovanja NEK 1600 izrabljenih gorivnih elementov, bi bila cena za skladiščenje teh elementov v vsebnikih približno 52 milijonov dolarjev za obdobje 50 let.
- Shranitev v ta tip vsebnikov omogoča transport izrabljenega goriva bodisi na predelavo bodisi na končno odlagališče.

² Trenutno se tehnologija na tem področju še razvija. Tako v nekaterih državah raziskujejo možnost uporabe večnamenskih vsebnikov (multipurpose casks), ki bi služili za transport, shranjevanje in tudi odlaganje. Zato je potrebno stalno kontinuirano spremljanje razvoja .

-
- Vsebniki se lahko namestijo kjerkoli na lokaciji NEK brez večjih pripravljalnih gradbenih del.
 - Njihov radiološki nadzor je zelo enostaven.
 - Njihovo vzdrževanje in dekontaminacija je zelo enostavna in poceni.
 - Minimizarajo se operacije z gorivom - vsebniki se direktno polnijo v bazenu.
 - Motenje delovanja objektov in naprav je minimalno.
 - Mogoč je takojšen odvoz na vnaprej določene lokacije ob naravnih nesrečah ali v primeru vojne.
 - V okviru urejanja lastninskih relacij z Republiko Hrvaško o NEK je predviden v primeru lastninskega razmerja 50:50 prevzem sorazmernega deleža nizko, srednje in visoko radioaktivnih odpadkov. Solastnik bo gorivo lahko prevzel, saj za njegovo začasno hranjenje potrebuje le fizično in radiološko nadzorovano lokacijo.
 - Pridobivanje dovoljenj za obratovanje je olajšano, saj so upoštevani varnostni standardi MAAE.

4.1.4 Razgradnja

Odločitev o strategiji ravnanja z izrabljenim gorivom in VRAO zavisi seveda tudi od politične odločitve o obratovanju ali zaprtju NEK. Dosedanje študije so obravnavale naslednje variante:

- takojšnje zaprtje NEK - v tem primeru ni potrebno povečati bazena za izrabljeno gorivo, ki zadostuje do končne odločitve o trajnem odlagališču.
- zaprtje NEK do leta 2006 - potrebno bi bilo povečati skladiščne kapacitete.
- zaprtje po preteku napovedane življenske dobe - terminski načrt je prikazan v nadaljevanju.

Vsekakor je potrebno upoštevati smernice, ki jih je Državni zbor RS sprejel v Resoluciji o strategiji rabe in oskrbe Slovenije z energijo. Ta določa dolgoročno strateško usmeritev, da Slovenija na varen, ekološko in ekonomsko sprejemljiv način opusti obstoječo proizvodnjo električne energije na osnovi jedrske energije. Na tej osnovi se ne načrtuje izgradnja novih jedrskih elektrarn, nadaljnje obratovanje in postopno ustvarjanje pogojev za varno razgradnjo NE Krško pa bo definiral nacionalni energetski program.

Poleg radioaktivnih odpadkov, ki nastajajo vsakodnevno iz različnih virov (medicina, industrija, jedrska elektrarna, raziskovalni reaktor), predstavljajo poseben vidik odpadki, ki bodo po zaprtju NEK nastali iz njene razgradnje. V ta namen je bil po naročilu Ministrstva za energetiko v letu 1992 narejen ničelni osnutek načrta razgradnje NEK, iz katerega je razvidno, da bo večina odpadkov navadnih (neaktivnih) industrijskih odpadkov. Skoraj vsi radioaktivni odpadki bodo klasificirani kot srednje ali nizkoaktivni odpadki in bodo kot taki odloženi v odlagališče NSRAO. Pričakujemo lahko le zmerno količino odpadkov z alfa nosilci (npr. kontaminacija z transuranskimi elementi zaradi puščanja goriva). Teh odpadkov ne bo pred začetkom dekontaminacije in dokončnim rastavljanjem, to je pred letom

2050 (30 let po predvideni zaustavitvi elektrarne - priporočilo IAEA), zato v študijah za te odpadke niso obdelane kake posebne rešitve.

4.2 Raziskovalni reaktor TRIGA

Raziskovalni reaktor TRIGA Mark II v reaktorskem centru Instituta Josef Stefan v Podgorici je homogen reaktor, namenjen raziskovalno pedagoški dejavnosti ter proizvodnji izotopov namenjenih medicini.

Gorivo je trdna, homogena zlitina urana in cirkonijevega hidrida. Vsebuje 8 - 12 utežnih % urana z obogatitvijo od 20% do 70 %.

V reaktorskem centru se nahajata dva bazena za izrabljeno gorivo. Število izrabljenih gorivnih palic iz leta 1995 je naslednje:

- 67 elementov z aluminijevo srajčko, 20 % obogatitev
- 125 elementov z jekleno srajčko, 20 % obogatitev
- 1 element z jekleno srajčko, 70 % obogatitev.

Zmogljivosti obeh bazenov za izrabljeno gorivo so dovolj velike za shranitev vsega do sedaj proizvedenega izrabljenega goriva. Zaloge svežega goriva zadostujejo za obratovanje še vsaj za nadaljnjih 10 let. Zmogljivosti bazenov so takšne, da bo vanje mogoče spraviti tudi vse izrabljeno gorivo, ki bo nastalo med nadaljnjim obratovanjem.

Prek URSJV poteka akcija, v kateri se na pobudo DOE (Department of Energy, ZDA) išče možnost, da bi ZDA prevzele izrabljeno gorivo iz raziskovalnih reaktorjev ameriške izdelave. DOE sedaj pripravlja študijo o vplivu vračanja goriva iz raziskovalnih reaktorjev na okolje (Environmental Impact Study - EIS). Vlada ZDA je s podpisom Record of Decision (ROD) dne 13. maja 1996 sklenila, da bo sprejela nazaj vse gorivo iz raziskovalnih reaktorjev, ki je po poreklu iz ZDA. Sklep je časovno omejen na 10 let od njegovega sprejema s tem, da se dovoli uvoz obsevanega goriva (zaradi potrebnega hlajenja in transporta) v ZDA v nadaljnjih treh letih po izteku tega roka. Izvoz 218 gorivnih elementov v ZDA naj bi bil realiziran v letu 1997. V TRIGI bo ostalo 95 gorivnih elementov, ki bodo zadoščali za obratovanje reaktorja naslednjih 10 - 15 let. Strategija ravnanja s preostalimi gorivnimi elementi bo obdelana pri naslednji novelaciji tega dokumenta. Če ZDA goriva iz reaktorja TRIGA ne bi hotele prevzeti in bi v približno desetih do dvajsetih letih prišlo do dokončne zaustavitve raziskovalnega reaktorja ter do njegove popolne razgradnje, bi gorivo iz TRIGE prav tako lahko shranili v suhi transportno shranjevalni vsebnik in dokončno rešitev iskali v sklopu goriva iz NEK.

5. Terminski načrt strategije

Iz vsega navedenega izhaja kot okvirni predlog strategije ravnanja z izrabljenim jedrskim gorivom in VRAO odloženo reševanje problema končnega odlaganja (deferred decision). Terminski načrt je v danih razmerah težko postaviti. Posebej pri NEK je kar nekaj odprtih vprašanj, od katerih močno zavisi tudi terminski načrt, zato je izdelan le časovni okvir za izvajanje predlagane strategije odloženega reševanja končnega odlaganja .

NEK:

Ob predpostavki, da bo elektrarna zaprta po preteku njene življenske dobe, lahko pri izboru strategije predvidimo naslednje korake:

V letu 1996 :

Do konca leta 1996 bodo v NEK izdelane analize izvedljivosti in izdelan idejni projekt za razširitev skladiščnih kapacitet v bazenu za izrabljeno gorivo. Na podlagi teh analiz bo možna odločitev za najprimernejšo varianto v letu 1997.

V letu 1997 (ključna točka odločitve - izbor začasne rešitve):

Odločitev med :

- a) predelavo goriva (zaenkrat odsvetovana, v tem trenutku tudi ni izvedljiva);
- b) razširitev zmogljivosti sedanjega bazena (na podlagi analize izvedljivosti izbira ene izmed navedenih opcij ali kombinacije dveh v podpoglavju 4.1.3.), izbira projekta, izbira ponudnika in izvedba razširitve, ki bo predvidoma končana do konca leta 1999;
- c) suho skladiščenje (priporočeni so transportno - shranjevalni vsebniki).

Do leta 2000:

V primeru, da bi bila v letu 1997 izbrana varianta c), bi bilo do leta 2000 potrebno:

Izbora tehnologije suhih transportno - shranjevalnih vsebnikov, nakup tehnologije, prenos tehnologije zainteresiranim domačim podjetjem, licenciranje vsebnikov, pridobitev dovoljenj za prehodno skladiščenje, proizvodnja prvih vsebnikov, operativni pogovori s solastnikom o prevzemu pripadajočega deleža goriva, polnjenje prvih vsebnikov.

Leta 2007:

Prevzem polovice goriva s strani solastnika.

Do leta 2020: (ključna točka odločitve - izbor trajne rešitve)

Iskanje in določitev lokacije za odlagališče VRAO na ozemlju RS ali/in solastnika, izbor tehnologije odlaganja (nepredelano izrabljeno gorivo ali odpadki od predelave). Hkrati bi tekli pogovori o možnosti trajnega izvoza izrabljenega goriva v tretje države, kar najbrž ob sedanjih predpostavkah nima realnih izgledov za uspeh.

Po letu 2020:

Datum se približno ujema z načrtovanim zaprtjem NE Krško po izteku predvidene življenske dobe. Po dokončnem zaprtju začetek razgradnje. Končna rešitev - odlagališče VRAO - se predvideva po letu 2050.

TRIGA:

Stiki z DOE za morebiten odvoz goriva v ZDA. Če odvoza ne bo, shranitev izrabljenega goriva v bazenih ob TRIGI, po dokončnem zaprtju in razgradnji prenos v suhi vsebnik ter v končno odlagališče.

6. Ekonomski vidiki

Priprava ekonomske ocene različnih tehnoloških rešitev temelji na naslednjih korakih:

- definiranje scenarija shranjevanja goriva,
- analiza tehničnih vidikov različnih konceptov,
- ocena stroškov različnih alternativ,
- izračun normiranih stroškov,
- izvedba analize občutljivosti.

Ekonomska analiza mora temeljiti na dobro definiranih scenarijih. Bistveni parametri, ki so potrebni za njihovo določitev, so:

- tip skladiščenja,
- lokacija,
- količina goriva (zmogljivost skladišča),
- časovni načrt (povprečne količine izrabljenega goriva na leto),
- čas skladiščenja,
- čas, potreben za začetek obratovanja skladišča,
- tip goriva, začetna obogatitev, izgorelost in minimalen čas hlajenja goriva,
- posebne zahteve (fleksibilnost, zakonske zahteve...).

Celotni stroški vsakega scenarija se določijo kot vsota poglavitnih delnih stroškov, kjer nezanesljivost vsakega dejavnika vpliva na natančnost končne ocene stroškov. Stroške ponavadi razdelimo na pet poglavitnih kategorij:

-
1. Začetni stroški (od preliminarnih študij do odločitve),
 2. Investicijski stroški (od odločitve do začetka obratovanja),
 3. Stroški obratovanja,
 4. Transportni stroški (od reaktorja do objekta),
 5. Razgradnja skladišča.

Izkušnje kažejo, da so realni stroški ponavadi dokaj različni od napovedanih. Najpomembnejši dejavniki, ki vplivajo na rast stroškov in katere lahko pri oceni upoštevamo so:

- izboljšave projekta,
- modifikacije projekta,
- produkcijske zmogljivosti (izdelava opreme in naprav),
- upravljanje in vodenje projekta,
- vrednost denarja (inflacija).

Iz navedenega je razvidno, da je za uporabno analizo ekonomskih vidikov potrebno izvesti podrobno študijo, izvedeno z ustrežno metodologijo in opremljeno z ocenami nezanesljivosti. Pri tem se moramo zavedati, da ekonomski vidiki ponavadi igrajo pomembnejšo vlogo le, ko se izbrane mogoče alternative med seboj po drugih merilih bistveno ne razlikujejo. Seveda pa so bistvenega pomena pri uresnitvi izbrane alternative ter njeni racionalizaciji.

7. Zaključek

Pričujoči predlog strategije povzema dosedanje študije, ki so bile narejene na področju ravnanja z VRAO v Republiki Sloveniji ter dodatne najnovjše podatke iz NE Krško. Podaja tehnološke možnosti, ki trenutno obstajajo v svetu, kot tudi alternative, ki bi bile primerne za Slovenijo. Podana so splošna in projektna merila, ki so uveljavljena v svetu in od katerih zavisi izbira strategije ravnanja z VRAO. Vhodne podatke za strategijo bo potrebno ažurirati. Predlagana pogostnost ažuriranja naj bi bila vsakih tri do pet let.

Republiki Sloveniji se priporoča odloženo reševanje problema VRAO (deferred decision). Do leta 2020 bi moral biti opravljen izbor trajne rešitve odlaganja VRAO. Izgradnja odlagališča in njegovo obratovanje se predvideva za leto 2050. V vmesnem obdobju se bo problem VRAO reševal z razširitvijo trenutnih skladiščnih zmogljivosti in/ali s prehodnim skladiščenjem izrabljenega goriva. Izbor prehodnega skladiščenja je še odprt, ravno tako tudi izbira razširitve trenutnih skladiščnih zmogljivosti, ki je v pristojnosti NE Krško. Obstaja pa tudi možnost kasnejše odločitve za predelavo izrabljenega goriva oziroma za trajni izvoz, če bo ta opcija takrat obstajala.

V letu 1996 Agencija RAO načrtuje redno spremljanje razvoja tehnologij, ki so bistvene za odločitve o ravnanju z izrabljenim jedrskim gorivom. V tem letu bo v NEK tudi izdelana analiza izvedljivosti povečanja zmogljivosti skladiščenja izrabljenega goriva, na podlagi katere bo izbira opcije oziroma kombinacije opcij možna. V letu 1997 pa bo potrebno sprejeti odločitev o načinu razširitve skladiščnih kapacitet za izrabljeno jedrsko gorivo v NEK.

8. Viri

1. Povzetek mednarodnih izkušenj na področju ravnanja z VRAO in globinskega odlaganja VRAO, IJS, 1995
2. Podlage za strategijo ravnanja z visokoradioaktivnimi odpadki v RS, IBE, IJS, 1993
3. Povzetek mednarodnih izkušenj na področju ravnanja z VRAO in globinskega odlaganja VRAO - geološki del, GZL-IGGG, Ljubljana, 1994
4. TRS No.240: Guidebook on Spent Fuel Storage, Second Edition, IAEA, Vienna, 1991
5. Resolucija o strategiji rabe in oskrbe Slovenije z energijo (ReSROE), Ur.l.RS 9/96
6. Drugi viri (revije, članki)