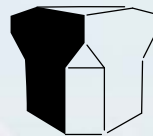


**Institut "Jožef Stefan"**  
50 let REAKTORJA TRIGA



# Predgovor

31. maja 2016 ob 14.15 je minilo natanko petdeset let od prve kritičnosti reaktorja TRIGA Mark II (Reaktor) v Podgorici pri Ljubljani. Moj prvi stik z Reaktorjem sega v drugo polovico sedemdesetih let prejšnjega stoletja, ko sem pod mentorskim vodstvom prof. dr. Ladislava Koste, takratnega vodje Odseka za jedrsko kemijo Instituta "Jožef Stefan" (IJS), opravljal eksperimentalni del diplomske naloge s področja uporabe nevtronske aktivacijske analize (NAA). Kot kemik nisem vedel veliko o jedrskem reaktorju, moje delo kot »uporabnik« nevtronov je bilo omejeno na predajo vzorcev za obsevanje operaterjem ali kvečjemu samostojno obsevanje vzorcev s pomočjo pnevmatskega transportnega sistema. Tudi kasneje, med nadaljnjim študijem in po njem, sem bil predvsem uporabnik reaktorja, bodisi z nevtronsko aktivacijsko analizo, bodisi pri proizvodnji radioaktivnih izotopov. NAA je ena od dejavnosti, ki se z velikimi mednarodnimi dosežki izvaja že vseh 50 let.

Šele po vrnitvi z IAEA leta 2003 sem pričel tesneje sodelovati s takratnim vodjem Reaktorskega infrastrukturnega centra (RIC) prof. dr. Matjažem Ravnikom ter se na ta način spoznavati s teoretskimi osnovami jedrskega reaktorja in problematiko varnega obratovanja. Takrat in pozneje, ko sem sam prevzel vodenje RIC, sem pričel bolj spoznavati zavzetost in profesionalnost osebja, ki neposredno ali posredno upravlja z reaktorjem ter skrbi za njegovo varno obratovanje.

Ko danes pogledamo nazaj v čas postavitve Reaktorja, je razvidno, da je ta dogodek pomembno vplival ne samo na razvoj jedrske stroke, ampak je Reaktor postal pomemben del Instituta, ki se je tekom let razvil

v odlično slovensko in mednarodno ugledno znanstveno-raziskovalno ustanovo. Naš Reaktor je v svetu dobro znan in ga v strokovnih krogih radi navajajo za zgled, kaj vse se da narediti tudi z majhnim raziskovalnim reaktorjem in omejenimi viri.

Reaktor je postal eden od stebrov izobraževanja jedrskih strokovnjakov in jedrskih raziskav v Sloveniji in širše ter tudi simbol odprtosti vsem, ki jih zanimajo jedrske dejavnosti, saj je odprt za širšo javnost ob ustreznem spoštovanju pravil za obiskovalce. Preko kakovostnih raziskav in vrhunske izobraževalne dejavnosti je z leti pridobil široko mednarodno razpoznavnost tako v Evropi kot tudi v širšem svetovnem merilu in postal svojevrsten zaščitni znak Instituta "Jožef Stefan" (IJS).

Prevladujoče izobraževalne in raziskovalno-razvojne aktivnosti na in ob Reaktorju so se z leti spreminjale oziroma dopolnjevale, skladno z nacionalnimi zahtevami in svetovnimi usmeritvami. Ključne dejavnosti, ki so se odvijale v preteklosti, ki potekajo v sedanjosti, oziroma so načrtovane v prihodnosti, so v zgoščeni obliki predstavljene v naslednjih poglavjih.

Informacije, vsebovane v tej brošuri, izpovedujejo preteklost, opisujejo sedanjost in predstavljajo usmeritev za bodoče generacije. Prepričan sem, da preteklost in sedanjost Reaktorja ter predanost in zavzetost njegovega osebja zagotavljajo zdravo osnovo za mnogo nadaljnjih let uspehov in razvoja v prihodnosti.

prof. dr. Borut Smodiš, vodja Reaktorskega infrastrukturnega centra

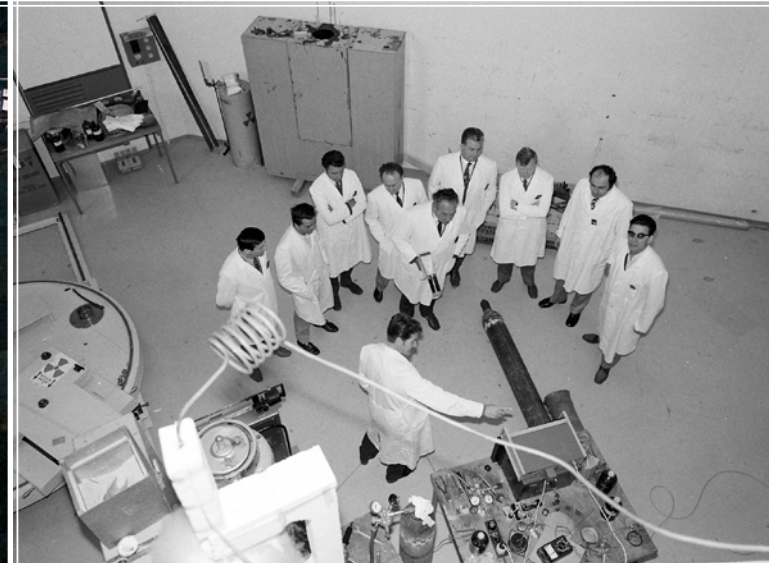
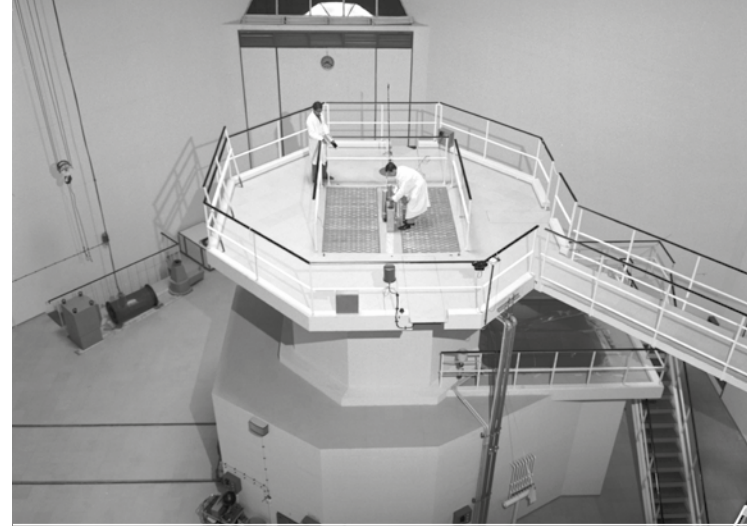


# Uvod

Zgodovina reaktorjev TRIGA (»Training, Research, Isotopes, General Atomics«) sega v avgust leta 1955, ko je Organizacija združenih narodov (OZN) v Ženevi, Švica, organizirala Mednarodno konferenco o miroljubni uporabi atomske energije. Prisotni ameriški fiziki, med njimi Frederic de Hoffmann, so na konferenci ugotovili, da je dozorel čas za razvoj komercialnih raziskovalnih jedrskih reaktorjev. De Hoffmann je prepričal firmo General Dynamics, da je leta 1956 ustanovila divizijo General Atomic (GA), danes poznano kot General Atomics, z njim kot prvim predsednikom. Ob pomanjkanju ustreznih prostorov so najeli kar nekdanje poslopje šole Barnard na območju San Diega in pričeli z razvojem reaktorja, ki bi ga lahko »dali gruči srednješolcev, ki bi se z njim igrali brez strahu pred poškodbami«. Prototip reaktorja, ki so ga poimenovali TRIGA Mark I, je postal prvič kritičen 3. maja 1958, torej manj kot dve leti po pričetku razvoja. Je edini raziskovalni reaktor, ki v svoji kategoriji namesto konstrukcijske varnosti ponuja inherentno varnost. Izjemna demonstracija njegove varnosti in preprostosti je bila predstavljena na drugi Mednarodni konferenci o miroljubni uporabi atomske energije v Ženevi leta 1958, kjer so predstavili demonstracijski model in še bolj na Kmetijski konferenci v New Delhiju leta 1959–1960, kjer so celo predstavili pulziranje reaktorja.

TRIGA reaktorji so najbolj razširjeni na svetu, saj so doslej zgradili 66 naprav v 24 državah na 5 kontinentih, z močmi od 20 kW do 16 MW. Po podatkih baze o raziskovalnih reaktorjih Mednarodne agencije za atomsko energijo (IAEA) danes obratuje preko 30 reaktorjev vrste TRIGA v več kot 15 državah.

Ideja za gradnjo raziskovalnega reaktorja v Ljubljani sega v leto 1955. Preliminarni sporazum med takratno Zvezno komisijo za nuklearno energijo in ameriškim podjetjem GA o nakupu reaktorja TRIGA Mark II za takratni Nuklearni inštitut »Jožef Stefan« (NJS) je bil podpisan junija 1960. Julija 1961, zgolj tri leta po prvi demonstraciji uspešnosti reaktorja, je NJS podpisal sporazum o nakupu 250 kW reaktorja TRIGA Mark II z GA. Pogodba o nabavi jedrskega goriva za Reaktor je bila sklenjena med IAEA, Komisijo za atomsko energijo ZDA in Vlado SFRJ, podpisana pa je bila oktobra 1961 na Dunaju. Projekt in program investicij sta bila pripravljena do konca leta 1961, gradnja pa se je pričela maja 1963. Po vložitvi gorivnih elementov v sredico reaktorja je bila 31. maja 1966 dosežena prva kritičnost, že v začetku junija istega leta pa se je pričelo redno obratovanje reaktorja.



# Arhitektura

Gradnja objektov v Podgorici se je pričela maja 1963. Gradnjo je prevzelo projektantsko podjetje Slovenija projekt pod vodstvom dipl. inž. arh. Otona Jugovca. To je bil prvi veliki Jugovčev projekt, pri katerem je združil vse svoje dotodanje izkušnje in znanje. Reaktorska zgradba je bila zasnovana zelo izvirno, za arhitektonsko zasnovo celotnega reaktorskega centra pa je arhitekt Jugovec dobil nagrado Prešernovega sklada. Reaktorska zgradba predstavlja nenavaden volumen zasukanega kvadratnega tlorisa in nenavadne oblike geometrično deformirane kocke reaktorja. Deformirana kocka simbolno predstavlja gobo, ki nastane po jedrski eksploziji. Oba, tako tloris kot oblika, govorita o modernistični abstrakciji, ki so jo v arhitekturno govorico znali vplesti le redki arhitekti. Tlorisno zasnovo reaktorskega centra v Podgorici (RCP) so sestavljali pogonski objekt in trakt za fiziko na severu ter reaktorska zgradba in trakt za kemijo na južni strani. Pritlični trakt za fiziko je bila steklena konstrukcija z montažnimi fasadnimi polnili (betonske lamele), notranjost pa je bila konstrukcija s predelnimi stenami iz aluminijastih vertikal in lesenimi opažnimi ploščami, obarvanimi v rdeče. Stranska fasada pokaže, da gre za dvakrat zgibano dvokapno streho. Vodni stolp je umestil na drugo stran kompleksa ob kotlarno in transformatorsko postajo in ga obogatil z inovativno oblikovanim stopniščem – elipso stopnic. Osnovne elemente tega izredno zanimivega objekta je torej na eni strani tvoril vase obrnjen osrednji volumen, na drugi pa razraščena kompozicija ostalih objektov z montažno obešenimi fasadami.

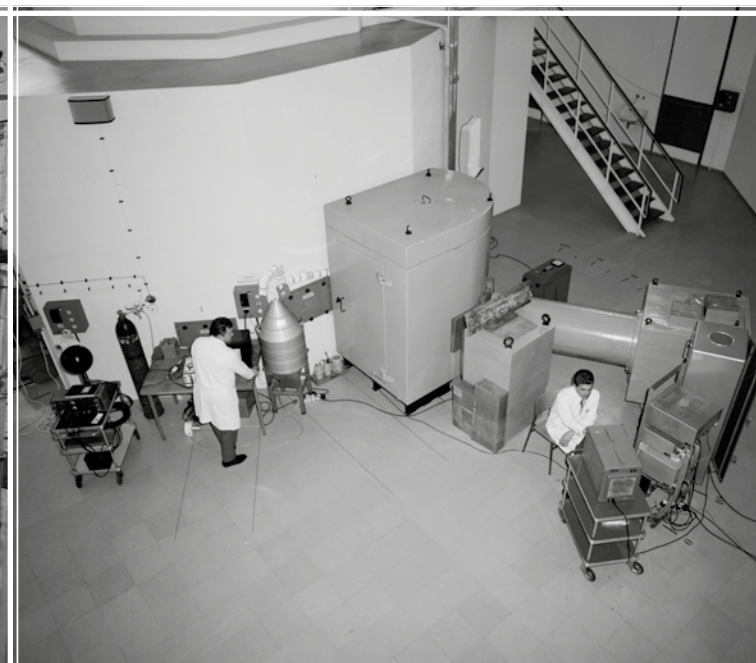


# Opis reaktorja

Reaktor ima nazivno toplotno moč 250 kW. Sama sredica reaktorja se nahaja na dnu bazena, ki je na vrhu odprt in napolnjen z demineralizirano vodo. Sredica se hladi pasivno, z naravno konvekcijo vode. Če reaktor obratuje dlje časa, je potrebno zagotoviti le hlajenje vode v bazenu.

V reaktorski sredici je 91 pozicij, kamor se lahko vstavijo gorivni elementi, kontrolne palice, obsevalni kanali ali nevtronski izvir. Sredico obdaja grafitni reflektor, v katerem se nahaja 40 obsevalnih mest. Poleg navpičnih obsevalnih kanalov, ima reaktor TRIGA tudi horizontalne kanale, po katerih lahko vstavljamo večje vzorce ali pa vodimo nevtrone do eksperimentalnih naprav. Zanimivi sta predvsem termalna in termalizirajoča kolona. Prva služi kot vir termičnih nevtronov, druga pa vodi do »suhe celice«, ki je večji prazen prostor in omogoča obsevanje večjih vzorcev v homogenem polju nevtronov.

Za zagon, zaustavitev in kontrolo moči reaktorja so na voljo štiri kontrolne palice. Njihova glavna naloga je absorbirati nevtrone, to pa povzroči bor, ki je prisoten v vsaki kontrolni palici v obliki  $B_4C$ . Tri imajo gorivne podaljške. Ko se iz sredice dvigne absorber, pride na njihovo mesto gorivni element. Na tak način se poveča vpliv palice. Četrta kontrolna palica pa nima gorivnega podaljška. Pod njo se nahaja praznina. Ta palica se uporablja za izstrelitev v pulznem načinu obratovanja.



# Tehnične značilnosti

## Gorivo

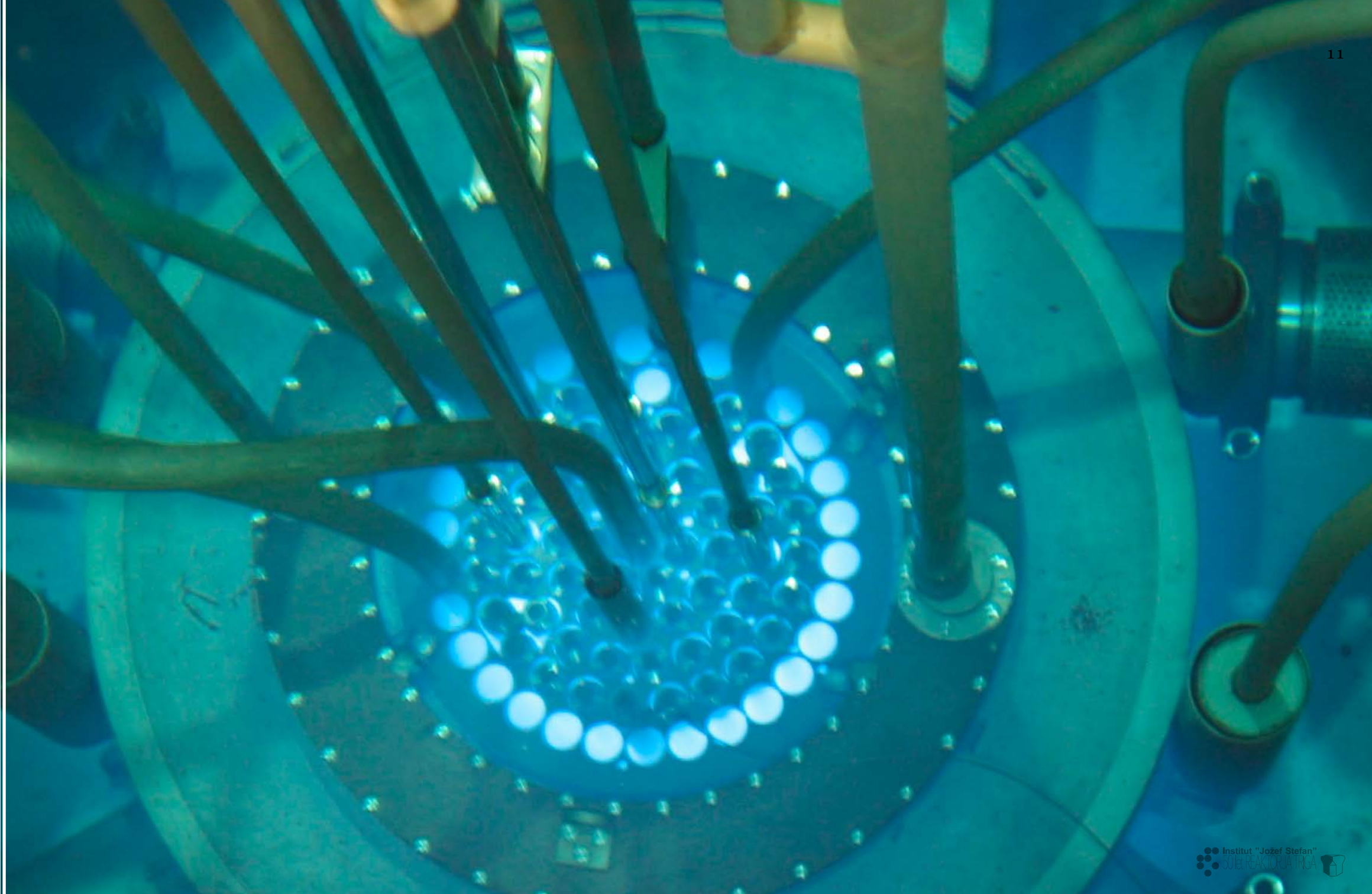
Uran v gorivu je obogaten na 20 % in v obliki trdne homogene zlitine urana in cirkonijevega hidrida ( $UZrH$ ), kar je posebnost reaktorjev TRIGA in jim daje prav posebno lastnost – takojšnjo močno negativno povratno zanko. V primeru, da moč reaktorja hitro narašča, se gorivo hitro segreva, kar onemogoči upočasnjevanje nevtronov (vodik – moderater je homogeno vezan na gorivo) in posledično reaktivnost hitro upade. Pojav je tako hiter, da omogoča celo pulzno obratovanje reaktorja.

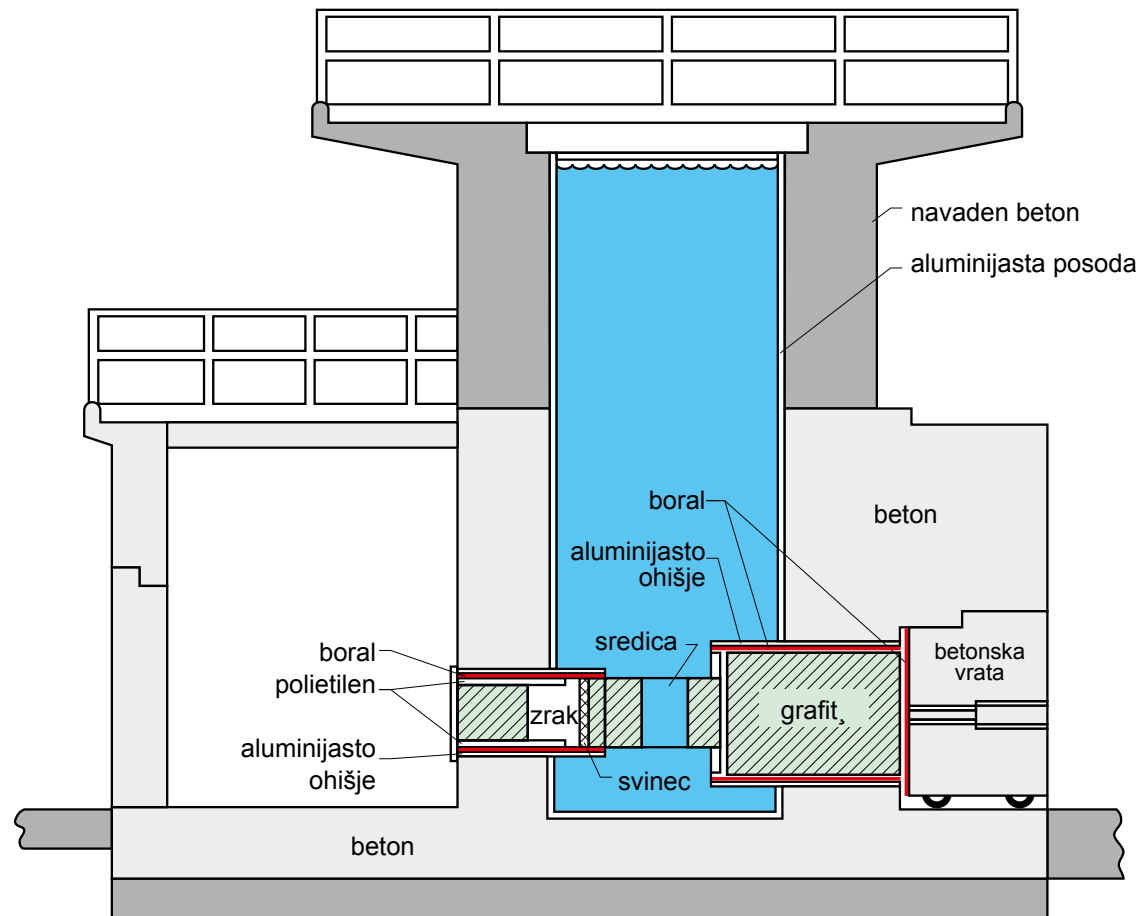


## *Pulzno obratovanje*

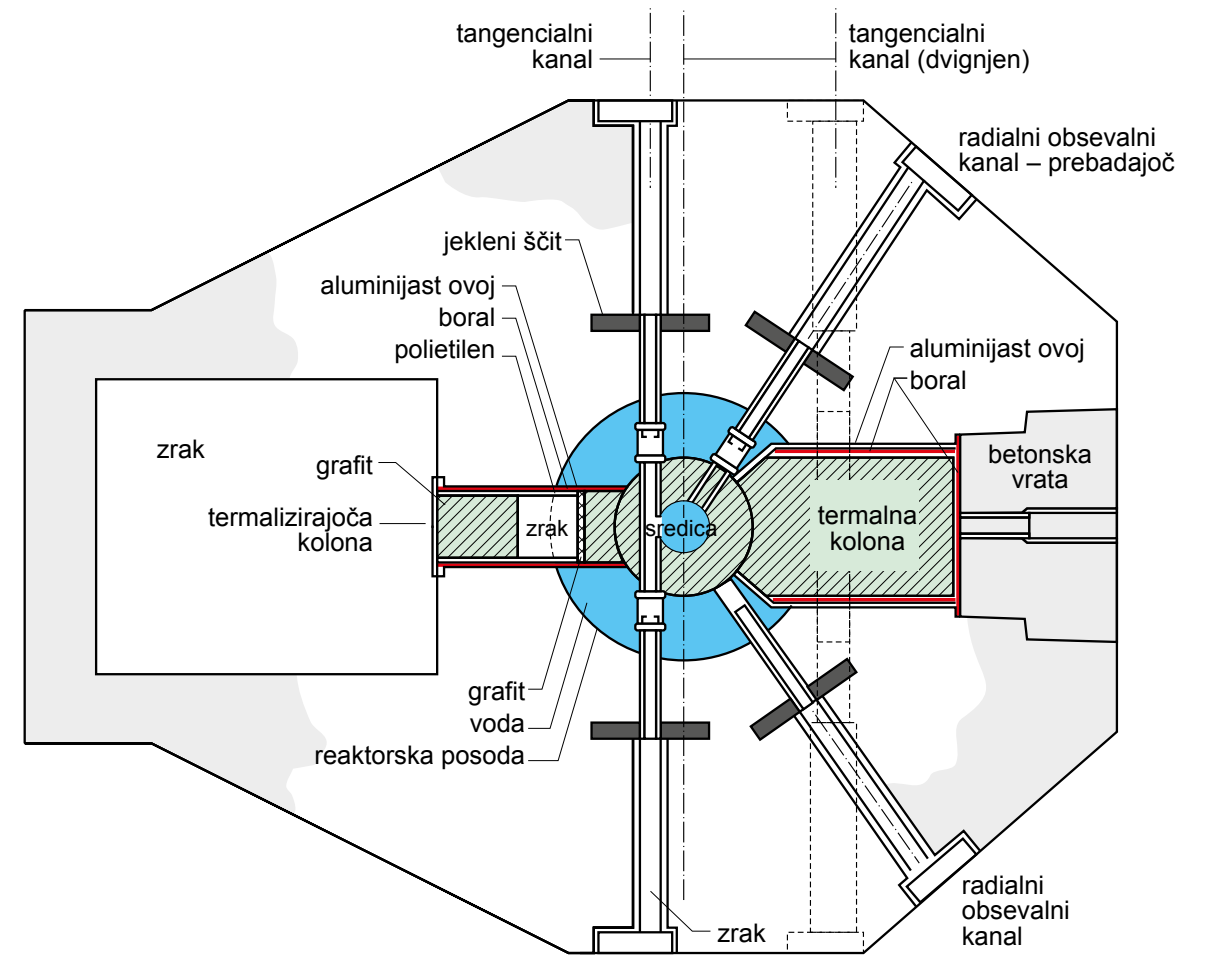
*Za pulzno obratovanje je potrebno spremeniti reaktivnost sistema za več kot 1 \$, kar je sicer ravno delež zakasnelih nevtronov. Takrat so za vzdrževanje (nad) kritičnosti dovolj že takojšnji nevtroni. To pomeni, da se populacija nevtronov pomnožuje in raste izjemno hitro, podobno kot med jedrsko eksplozijo. Da je takšno početje v reaktorski sredici povsem varno, poskrbi posebna sestava goriva, ki je značilna za reaktorje TRIGA.*

*Hitra sprememba reaktivnosti se doseže z izstrelitvijo pulzne palice iz reaktorske sredice s pomočjo stisnjenega zraka. Moč reaktorja se lahko dvigne do 1 GW (polovica moči Nuklearne elektrarne Krško), a le za kratek čas (nekaj ms). Nato moč hitro pade, ponoven dvig pa prepreči signal za hitro zaustavitev reaktorja – 6 sekund po izstrelitvi pulzne palice. Pulzni način obratovanja je bil zasnovan za testiranje odpornosti vojaških komponent na jedrsko eksplozijo. Danes se uporablja za namene preveritve različnih računskih modelov reaktorja, saj je pulz moči analog funkciji delta obratovanja reaktorja na konstantni moči. Uporablja se tudi za testiranje odpornosti elektronskih komponent v primeru nezgode v jedrskih elektrarnah in za izobraževalne namene. Študenti opazujejo parametre različno velikih pulzov in preverjajo skladnost z računskimi modeli.*





Vzdolžni prerez reaktorja



Prečni prerez reaktorja

# Začetki 1966 - 1970

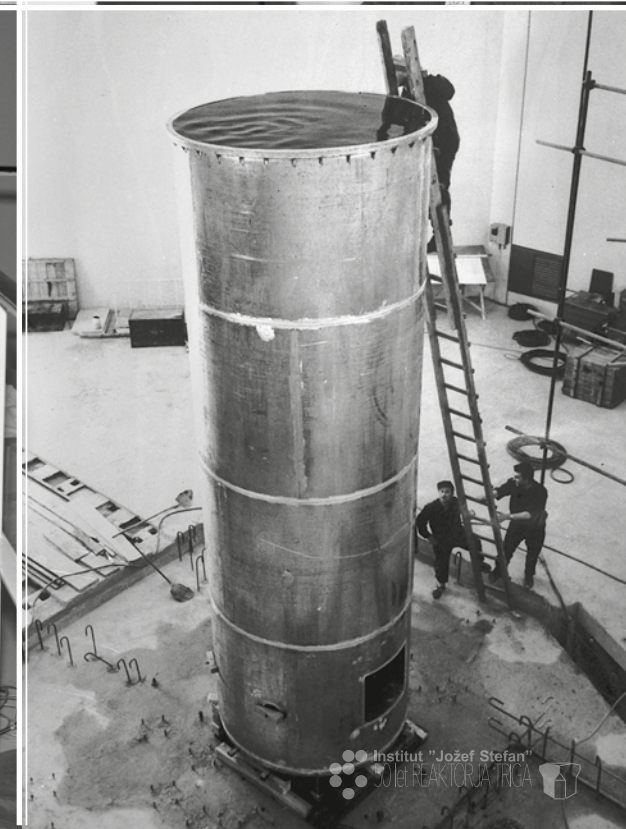
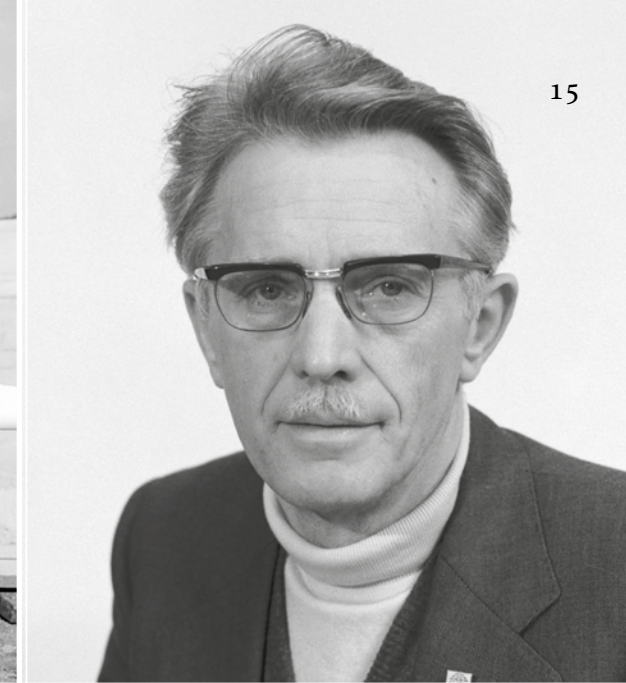
Reaktor naj bi bil prvotno namenjen predvsem raziskovanju biološke zaščite in reaktorskih materialov. Reaktor, kot močan izvir nevtronov, naj bi raziskovalnim skupinam Instituta omogočal tudi študij razpada kratkoživih izotopov in neelastičnega sipanja nevtronov. Poleg tega bi omogočil proizvodnjo izotopov za potrebe Instituta in drugih institucij, šolanje znanstvenikov in strokovnjakov na področjih reaktorske fizike in reaktorske tehnike ter omogočal vaje v okviru podiplomskih tečajev za študente Univerze v Ljubljani in praktično usposabljanje operaterjev jedrske elektrarne.

Prvi poskusi na Reaktorju so bili zaradi skrbne priprave eksperimentov in eksperimentalnih naprav še pred začetkom obratovanja opravljeni že leta 1966. Ob reaktorju je bil postavljen nevtronski difraktometer, oprema za meritev spektra počasnih nevtronov in spektrometer na čas preleta nevtronov. Eksperimentalni bazen reaktorja je bil predelan v t.i. »suho celico«, v kateri je bila tudi fisiska (cepitvena) plošča z zelo obogatenim uranom, kot vir hitrih nevtronov za meritve nevtronskih presekov. Tako so bili že takoj po začetku obratovanja Reaktorja izmerjeni prvi nevtronski preseki za nekatere elemente. Z neelastičnim sipanjem hladnih nevtronov so bile izmerjene difuzijske konstante protonov ob faznih prehodih nekaterih feroelektričnih materialov, obsevani so bili prvi radioaktivni izotopi za razne uporabnike, začele pa so se tudi priprave za meritve vsebnosti raznih elementov v vzorcih z nevtronsko aktivacijsko kemijsko analizo (NAA).

Prav NAA kot ena od metod kemijske analize, danes predvsem za ugotavljanje elementov, ki jih je težko določiti z drugimi metodami, predstavlja eno od stalnic uporabe Reaktorja v raziskovalne namene od začetka obratovanja do danes. V prvih letih je bil velik poudarek na raziskavah živega srebra v okolju, saj je takrat obstajal v Idriji drugi največji rudnik Hg na svetu. Opravljene so bile številne sistematične raziskave vsebnosti Hg v zemlji, vodi, zraku, ljudeh, ribah in živilskih izdelkih.

Reaktor je že od začetka obratovanja predstavljal središčno točko, okoli katere se je razvijala moderna tehnologija in to ne samo jedrska; številni uspešni strokovnjaki na področju računalništva, informatike, energetike, varstva pred sevanjem, tehnike, itd. so svoje delo začeli na Reaktorju. Tako je bil na primer za potrebe reaktorskih preračunov nabavljen prvi elektronski računalnik (ZUSE), s čimer se je začel tudi razvoj računalništva.

Na Reaktorju so pričeli svojo profesionalno kariero ali se izobraževali skoraj vsi jedrski strokovnjaki v Sloveniji, med njimi vsi profesorji reaktorske fizike in jedrske tehnike na univerzah v Ljubljani in v Mariboru ter ključni strokovnjaki Nuklearne elektrarne Krško (NEK), Uprave republike Slovenije za jedrsko varnost in Agencije za radioaktivne odpadke.



# Zlata doba Reaktorja 1970 - 1990

Leta 1972 je bil organiziran prvi tečaj iz osnov reaktorske fizike in tehnike za strokovnjake, ki so se vključili v priprave za gradnjo jedrske elektrarne v Krškem. Tečajniki so morali opraviti več kot deset eksperimentalnih vaj na Reaktorju. Tečaji so potekali skoraj deset let v organizaciji Odsekov za reaktorsko fiziko in Pogona reaktorja ter ob pomoči Mednarodne agencije za atomsko energijo, dokler ni bil ustanovljen današnji Izobraževalni center za jedrsko tehnologijo Milana Čopiča.

V začetku sedemdesetih let je bil postavljen v eksperimentalni kanal izvir hladnih nevtronov, ki je omogočil vrsto uspešnih meritev v fiziki trdne snovi. Tako so bile prvič na svetu izmerjene difuzijske konstante za vrsto tekočih kristalov s sipanjem hladnih nevtronov. Postavljen je bil tudi doma izdelan nevtronski difraktometer za strukturne raziskave. Pri tem difraktometru je veliko generacij študentov fizike proučevalo uklanjanje nevtronov.

Na Institutu je bila izdelana naprava za nevtronsko radiografijo za neporušne preiskave snovi z nevtroni. Naprava omogoča pregled raznih materialov, ki vsebujejo vodik in druge lahke elemente, kar ni mogoče z žarki gama.

V tem obdobju je Reaktor obratoval povprečno okrog 3.500 ur letno, kar ga je uvrščalo med najbolj uporabljane tovrstne raziskovalne reaktorje v svetovnem merilu. Glavne aktivnosti so vključevale:

- raziskave dinamičnih in strukturnih lastnosti trdnih snovi in tekočin s sipanjem hladnih in termičnih nevtronov;
- neporušne raziskave materialov z nevtronsko radiografijo;
- meritve jedrskih presekov, jedrskega šuma in jedrskega vrenja;
- kemijske analize z nevtronsko aktivacijsko analizo;
- pripravo različnih radioaktivnih izotopov za medicino in industrijo.

Dejavnost, povezana z uporabo NAA je bila razširjena na področja analize materialov, spremljanja kakovosti čiščenja odpadnih vod, onesnaženosti okolja s toksičnimi kovinami, ugotavljanja onesnažil s pomočjo bioindikatorskih organizmov, ipd. Delo je bilo usmerjeno še posebej v razvoj radiokemijskih metod (radiokemijska NAA – RNAA) za kvantitativno določanje zelo nizkih vsebnosti bistvenih in toksičnih elementov v različnih vzorcih žive in nežive narave. Dolgoletne izkušnje na tem področju, kakovostni merilni rezultati ter odmevnost dela v strokovni literaturi so bili osnova dolgoletnemu sodelovanju z uglednimi mednarodnimi organizacijami pri certifikaciji referenčnih materialov za kontrolo kakovosti analiznih meritev v posameznih laboratorijih po svetu.

Pomemben aplikativni prispevek k jedrski tehnologiji predstavlja razvoj in testiranje digitalnega merilnika reaktivnosti ter z njim povezanih računskih metod za potrebe NEK. Vsa eksperimentalna oprema in računalniške

kode so bili predhodno razviti in verificirani na Reaktorju. S pomočjo te inovacije je bil skrajšan čas vsakoletnih zagonских testov v NEK iz nekaj dni na nekaj ur, kar zagotavlja velik finančni prihranek pri obratovanju.

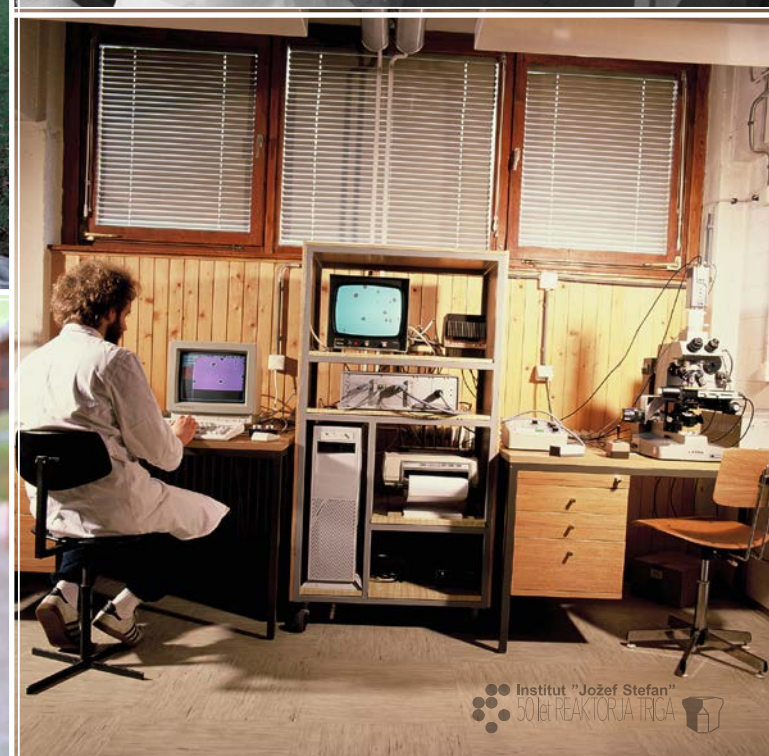
Z namenom, da bi se reaktor še bolj izkoristil, so bile razvite in izdelane naslednje izboljšave:

- izvir hladnih nevtronov s trdnim metanom kot moderatorjem, ki je močno povečal število nevtronov z majhno energijo, kar je omogočilo opravljati zahtevne raziskave dinamičnih lastnosti feroelektrikov, tekočih kristalov in bioloških materialov s sipanjem nevtronov. Ta naprava je uspešno delovala skoraj petnajst let;
- naprava za obsevanje vzorcev (vrtiljak za 40 obsevalnih kapsul), ki omogoča pnevmatsko vstavljanje in izvlečenje vzorcev iz reaktorske sredice. Ta naprava, zasnovana in izdelana na Institutu, še danes uspešno deluje;
- računalniški sistem, ki je omogočal zbiranje vseh podatkov, pomembnih za vodenje reaktorja;
- računalnik znamke CDC za vodenje vseh eksperimentov, ki so potekali na Reaktorju. S tem se je prvič v Sloveniji pojavil računalnik, ki je vodil neki proces, kar je vzpodbudilo uporabo računalnikov na mnogih drugih področjih. Številni raziskovalci, ki so ta računalnik uporabljali, so se pozneje uveljavili kot računalniški strokovnjaki.

Številne izboljšave, ki so bile zasnovane in uvedene na Reaktorju, rutinsko uporabljajo tudi drugi raziskovalni reaktorji po svetu.

Brez plačila je bilo pridobljenih 86 novih in 107 delno izrabljenih gorivnih elementov iz Nemčije, kjer so v osemdesetih letih zaprli dva raziskovalna reaktorja TRIGA.





# Zlata doba reaktorja 1970 - 1990

## Proizvodnja izotopov

Pomembna dejavnost Reaktorja v sedemdesetih in predvsem osemdesetih letih prejšnjega stoletja je bila izdelava nekaterih kratkoživih radioaktivnih izotopov, ki so jih v medicini potrebovali za diagnostične preiskave. V začetku sedemdesetih let je bila izdelana zelo zahtevna metoda za izdelavo radioaktivnega fluora ( $^{18}\text{F}$ ), ki so ga na Onkološkem inštitutu več kot deset let uporabljali za ugotavljanje rakastih obolenj kosti. S to metodo je bilo mogoče opraviti diagnozo tudi pri otrocih, saj radioaktivni fluor že po nekaj urah ni več radioaktiven in zato ne obremenjuje telesa.

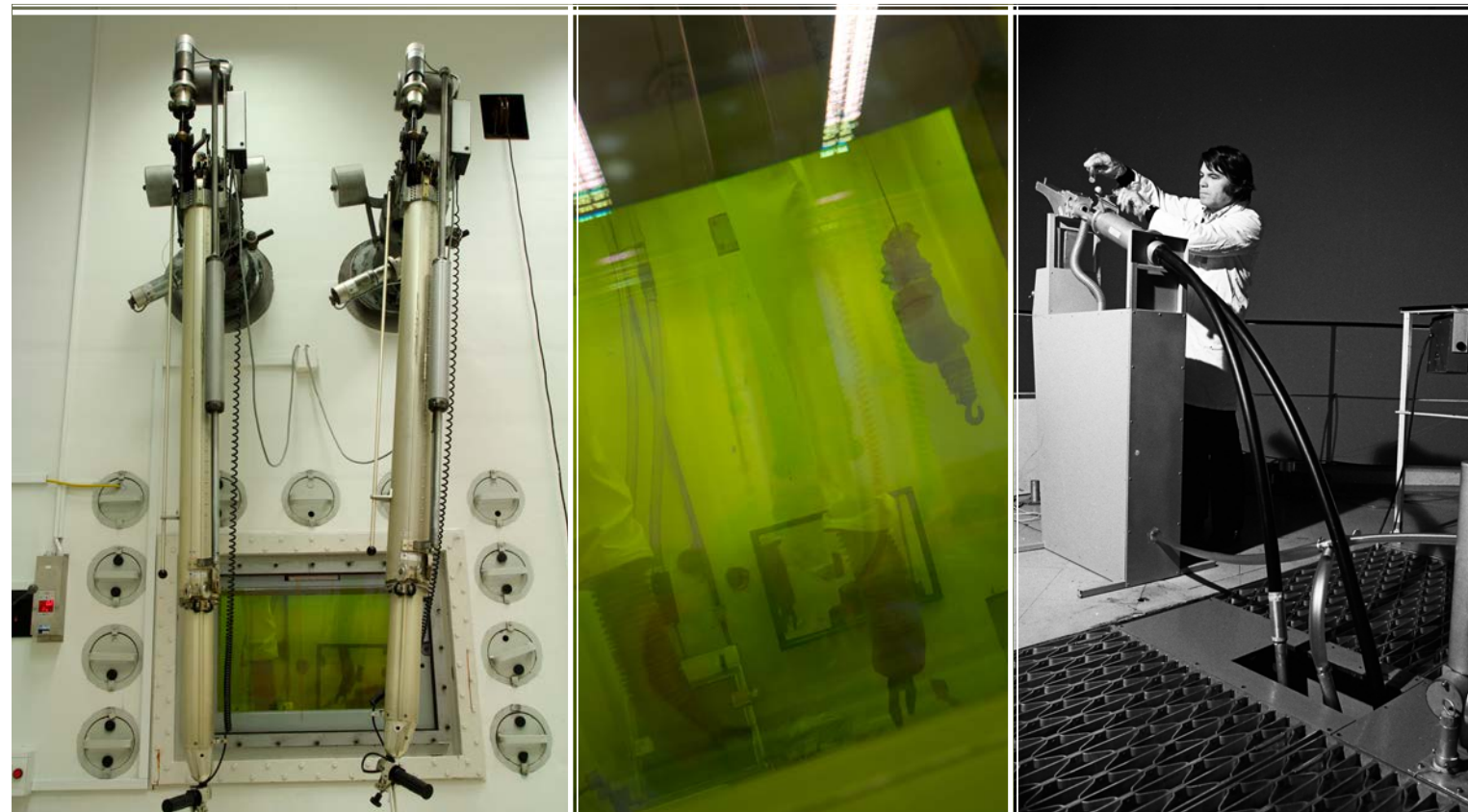
V začetku osemdesetih let so namesto  $^{18}\text{F}$  pričeli uporabljati tehnecej ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ), ki je zelo primeren izotop in ga je mogoče v omejenih količinah napraviti tudi v reaktorju relativno majhne moči. Tehnecej je umetni element, ki nastane z obsevanjem molibdena z nevtroni, iz katerega se nato s kemijskim postopkom osami in pripravi  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  v ustrezni biološko dostopni obliki. Na Reaktorju so v obdobju približno 15 let vsakodnevno izdelali dovolj tega izotopa, da so z njim lahko opravljali diagnoze raznih rakastih obolenj pri večini pacientov na Kliniki za nuklearno medicino Univerzitetnega kliničnega centra Ljubljana in na Onkološkem inštitutu Ljubljana. Vsak dan so laboratorijih Odseka za jedrsko kemijo IJS pripravili toliko  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , kolikor so ga zahtevali zdravniki, ki so s tem radioaktivnim izotopom pregledali vsak dan 100 in več ljudi. Zaradi velikih potreb po tehneciju je moral reaktor obratovati vsaj 80 ur na teden, da je bilo mogoče pripraviti dovolj  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ .

Razvite so bile tudi metode za pripravo drugih radioaktivnih izotopov za uporabo v medicini, kot na primer radioaktivni kripton za pregled pljuč, koloidno radioaktivno zlato za razne diagnostične potrebe; v reaktorju so obsevali tudi zrnca zlata in iridija za zdravljenje rakastih obolenj. Ocenjuje se, da so z radioaktivnimi izotopi, izdelanimi na Reaktorju, zdravili ali diagnosticirali več kot 50.000 pacientov (predvsem tehnecej, fluor-18 in zlato).

Na Reaktorju so obsevali tudi druge snovi, ki jih potrebujejo v industriji. Tako so več kot petnajst let pripravljali radioaktivni evropij za večje industrijske strelovode, radioaktivni cink za redne kontrole betonarn, radioaktivni brom za odkrivanje netesnosti cevi in za kontrolo prepustnosti vode skozi jezove vodnih elektrarn ter radioaktivni kobalt za merjenje nivoja raznih kemikalij in drugih tekočih snovi v industrijskih obratih. Izdelanih je bilo 10-20 industrijskih zaprtih virov na leto (pretežno kobalt), vsega skupaj več sto enot.

## Rekonstrukcija

Leta 1990 je bil izdelan program popolne obnove reaktorja, saj je bil velik del instrumentacije že zastarel. Prva obnova instrumentacije je bila sicer opravljena že leta 1982. Leta 1991 je bilo obratovanje reaktorja ustavljeno za skoraj dve leti. V tem času je bila zamenjana kontrolna miza reaktorja, vse električne napeljave, nekateri merilni instrumenti sevanja, del sredice reaktorja in postavljena je bila nova fizična zaščita reaktorskih prostorov. Obnovljen je bil ventilacijski sistem in zgrajeno novo skladišče za izgorele gorivne elemente s prostorom za 600 izrabljenih gorivnih elementov. Posebno zahtevna je bila sprememba obratovanja reaktorja; do leta 1992 je namreč reaktor obratoval pri konstantni moči 250 kW, po obnovi pa lahko obratuje tudi v pulzni obliki, ko se moč reaktorja poveča za nekaj deset milisekund na skoraj 1.000 MW.



# Začetek novega obdobja po letu 1992

V sedemdesetih letih prejšnjega stoletja je reaktor obratoval približno 2.300 ur letno, v osemdesetih pa tudi preko 4.000 ur; predvsem zaradi intenzivne proizvodnje izotopov. Ta izjemno visok delež obratovanja se je v začetku devetdesetih let zaradi prenehanja proizvodnje tehnecija ob prelomu tisočletja znižal na približno 1.200 ur; v zadnjih letih pa je upadel pod 1.000 ur letno. Drugi razlog za zmanjšanje obratovalnega časa pa je bilo znižanje sredstev za reaktorsko eksperimentalno fiziko ob hkratni povečani zapletenosti eksperimentov, predvsem primerjalnih (benchmark).

V tem obdobju reaktor tehnološko ni več mogel v polni meri konkurirati novejšim in sodobnejšim napravam, zato so pričeli raziskovalci, poleg nekaterih že preverjenih in uveljavljenih aplikacij, iskati tudi nove nišne priložnosti z visoko dodano vrednostjo lastnega znanja.

Eno takih področij je postala verifikacija in validacija računalniških kod in jedrskih podatkov. Raziskovalci IJS so tako zasnovali in izvedli vrsto skrbno načrtovanih eksperimentov z namenom vzpostavitve primerjav med reaktorji TRIGA, ki so jih zatem skrbno analizirali in ovrednotili s pomočjo naprednih matematičnih orodij. Ti eksperimenti so obsegali zelo natančne meritve kritičnosti goriva za reaktorje TRIGA, meritve nevtronskega spektra in porazdelitve nevtronskega fluksa ter pulzne eksperimente za primerjavo kinetičnih parametrov.

Drugo takšno področje predstavlja proučevanje odpornosti na sevanje, predvsem nevtronsko. Zaradi izjemno dobre karakterizacije nevtronskega fluksa je postal Reaktor globalni center za obsevanje silicijevih detektorjev, skupaj s pripadajočimi elektronskimi komponentami, ki se uporabljajo v Velikem hadronskem trkalniku Evropskega laboratorija za fiziko delcev CERN. Letno obsevajo približno 2.000 tovrstnih vzorcev z vsega sveta.

Nadaljevale so se aktivnosti, povezane z nevtronsko aktivacijsko analizo in nevtronsko radiografijo.

V poznih osemdesetih letih prejšnjega stoletja se je pričela uporabljati t.im.  $k_0$  metoda NAA, pri kateri niso potrebni standardi za določitev posameznih elementov. Ta metoda je tekom let postala glavno analitsko orodje na Reaktorju in je bila v letu 2009 akreditirana skladno s standardom ISO/IEC 17025. S to metodo danes opravljajo večino kemijskih analiz, ki obsegajo predvsem vzorce okolja, različne materiale in snovi za pripravo certificiranih referenčnih materialov.

Naprava za nevtronsko radiografijo je bila izdelana leta 1974 in izboljšana leta 1995. Glavna področja uporabe so obsegala:

- nevtronsko defektoskopijo;
- študij osnovnih lastnosti slikanja;
- preiskave gorivnih elementov;
- aplikacije v metalurgiji;
- preiskave za letalsko in kovinsko industrijo;
- preiskave arheoloških predmetov;
- kvantitativne meritve vlage in gradbenih materialov, ki vsebujejo vodik.

V zadnjih letih je ta dejavnost žal praktično presahnila.

V obdobju po letu 1992 se je močno povečalo udejstvovanje na izobraževalnem in vzgojnem področju. Poleg izvajanja praktičnih vaj za vrsto fakultet slovenskih univerz se je še posebej povečala vključenost v mednarodno usposabljanje; Reaktor se je vključil v vrsto mednarodnih mrež oziroma kolaboracij raziskovalnih reaktorjev. Ena od najpomembnejših je Vzhodnoevropska iniciativa raziskovalnih reaktorjev (»Eastern Europe Research Reactor Initiative« – EERRI) v okviru Mednarodne agencije za atomsko energijo, ki vključuje pet reaktorjev v štirih državah. V okviru te mreže se izvajajo redni šesttedenski tečaji usposabljanja strokovnjakov z vsega sveta na področju reaktorske in nevtronske fizike.

Leta 1999 so bili vrnjeni v ZDA vsi izrabljeni gorivni elementi (219 elementov), na podlagi ameriškega zakona, ki je omogočal vrnitev goriva, izdelanega v ZDA. Po tem letu so bile opravljene številne tehnične in varnostne izboljšave reaktorja, ki omogočajo varno obratovanje, saj je le-to vse od leta 1966 potekalo brez omembe vrednih nezgod, kar kaže na dobro usposobljene operaterje Reaktorja in na dobro delo Službe za varstvo pred ionizirajočim sevanjem.



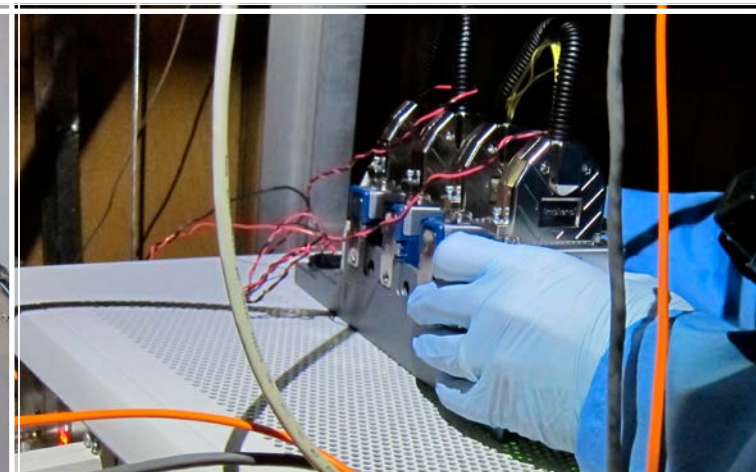
# Uporaba reaktorja danes

## Raziskovanje

Reaktor se tudi danes uporablja za raziskave, izobraževanje in praktične aplikacije. Predvsem gre za raziskave naprednih materialov (na primer silicijevega karbida in polprevodnikov), ki se bodo uporabljali v fuzijskih elektrarnah tipa ITER in v velikih pospeševalnikih. Fiziki ga uporabljajo za testiranje računskih in merskih metod ter programov, ki jih potem praktično in uspešno uporabljajo v NEK že od začetka njenega delovanja. V zadnjem obdobju se reaktor zelo intenzivno uporablja za testiranje odpornosti elektronike in polprevodnikov na sevanje nevtronov kot tudi na sevanje gama. Slednje se opravi pri zaustavljenem reaktorju, saj je aktivirano jedrsko gorivo odličen vir žarkov gama. Zaradi zelo dobrega poznavanja karakteristik nevtronskega polja je Reaktor postal referenčni center za obsevanje z nevtroni za CERN in druge pospeševalnike po svetu. V te namene pa ga uporabljajo tudi tuja in domača podjetja, ki izdelujejo elektronske komponente, ki bodo delovale v območju sevanja.

V zadnjih letih se krepi sodelovanje s francosko organizacijo CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). Francoski raziskovalci na reaktorju TRIGA testirajo nove detektorje za nevtrone in žarke gama. V sodelovanju s slovenskimi raziskovalci ugotavljajo natančne porazdelitve nevtronskega fluksa, kar je pomembno tudi pri razumevanju večjih reaktorjev kot je na primer NEK.

Stalnico predstavlja uporaba nevtronske aktivacijske analize za rutinske preiskave vzorcev okolja, predvsem pa za raziskave zahtevnejših materialov (keramika, plastika, ipd.) in karakterizacijo mednarodnih referenčnih materialov.

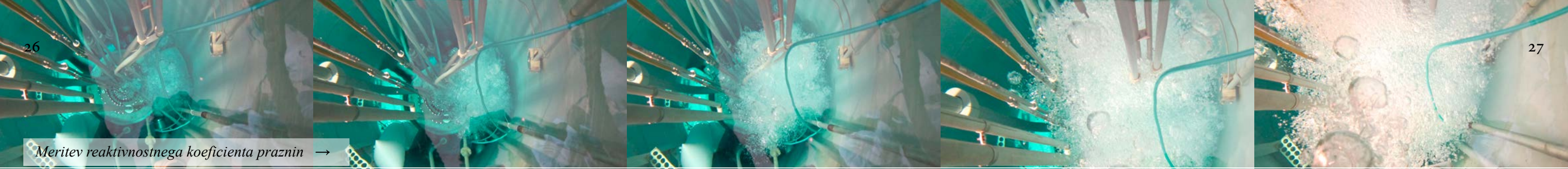


## Izobraževanje

Na Reaktorju so že od samega začetka pridobivali izkušnje in se izobraževali prvi jedrski strokovnjaki v Sloveniji. Strokovnjaki, ki so pomagali pri gradnji jedrske elektrarne v Krškem, so v veliki meri izhajali z Reaktorskega centra IJS, kasnejši vodilni delavci NEK in operaterji pa so se šolali na Reaktorju. Vsi bodoči operaterji in delavci v NEK del strokovnega usposabljanja, ki od leta 1985 poteka v sklopu tečajev Izobraževalnega centra za jedrsko tehnologijo Milana Čopiča, opravijo na Reaktorju. Večina eksperimentalnih vaj za tečajnike NEK je bila v zadnjem času posodobljena in digitalizirana. Kakovost vaj pa potrjuje dejstvo, da enake vaje opravljajo tudi študenti Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani ter udeleženci izobraževalnih tečajev EERRI.

Vsako leto z raziskavami, pri katerih uporabljajo reaktor, doktorirata eden do dva mlada znanstvenika (v vsej zgodovini reaktorja že več kot 60). Opravljenih je še od tri do pet magistrskih in diplomskih del. In ne nazadnje, Reaktor obišče vsako leto več kot 1.000 obiskovalcev, zlasti šolarjev, ki se tako seznanijo z uporabo nevtronov in jedrske energije. Tudi na področju izobraževanja in šolanja je Reaktor mednarodno uveljavljen, saj se na njem usposabljujejo in izobražujejo tako študenti evropskih univerz kot tudi jedrski strokovnjaki držav članic Mednarodne agencije za atomsko energijo, ki takšnih kapacitet nimajo.

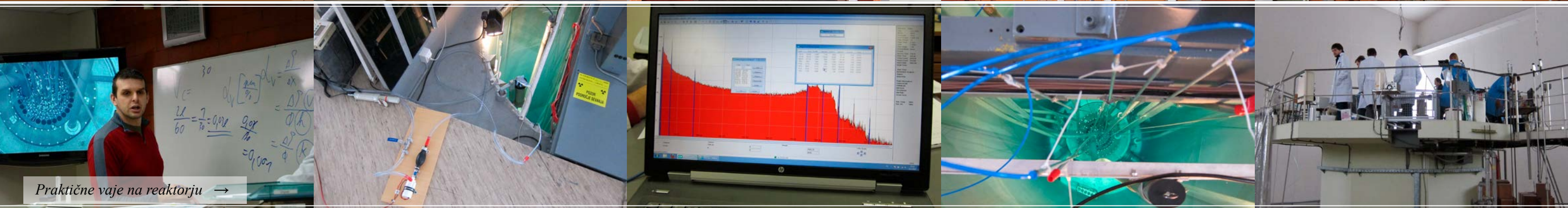




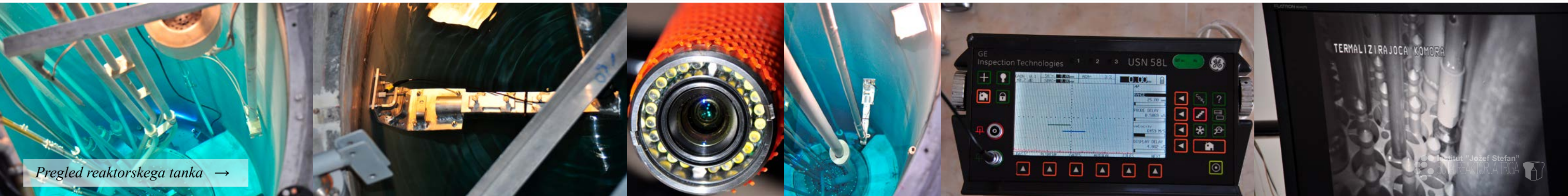
Meritev reaktivnostnega koeficienta praznin →



Suha celica →



Praktične vaje na reaktorju →



Pregled reaktorskega tanka →



*Zaposleni na Reaktorskem infrastrukturnem centru (od leve proti desni):*

- *Andrej Gyergyek, univ. dipl. fiz. – vodja programa za zagotovitev kakovosti,*
- *prof. dr. Borut Smodiš – vodja Reaktorskega infrastrukturnega centra,*
- *Anže Jazbec, univ. dipl. fiz. – operater,*
- *Sebastjan Rupnik, dipl. inž. fiz. – operater,*
- *Nina Udir, univ. dipl. inž. graf. tehnol. – poslovna sekretarka,*
- *Darko Kavšek, inž. el. – operater,*
- *Marko Rosman, elektrotehnik – operater,*
- *doc. dr. Luka Snoj – vodja Reaktorja TRIGA Mark II.*

## *Osnovne informacije*

*Lokacija: Brinje 40  
12 km SV od Ljubljane*

*Naslov: Reaktorski Infrastrukturni center  
Institut "Jožef Stefan"  
Jamova cesta 39  
1000 Ljubljana  
Slovenija*

*Telefon: +386 1 588 5450*

*Faks: +386 1 588 5377*

*Vodja: Prof. dr. Borut Smodiš*

*Viri: dokumentacija  
Institut "Jožef Stefan"*

*Besedilo: Reaktorski infrastrukturni center*

*Oblikovanje in  
priprava za tisk: Nina Udir*

*Lektoriranje: Roza Pergarec*

*Tisk: SILVECO, d.o.o.*

*Naklada: 200 kos*

*2. ponatis*

*Na zadnji strani:*

*Fotografija reaktorja TRIGA je bila objavljena aprila 2015 v reviji National Geographic Slovenija, v članku (Ne)Znana Ljubljana, ki odkriva manj znane zanimivosti Ljubljane.*

*Avtorji fotografije: Domen Pal, Jože Maček in Branko Čeak.*

